FUTURE TRANSPORTATION FUELS

ELECTRIC AND HYDROGEN-POWERED TRANSPORTATION

Canada

87-00614/

FUTURE TRANSPORTATION FUELS

ELECTRIC AND HYDROGEN-POWERED TRANSPORTATION

TABLE OF CONTENTS

Preface	3
ELECTRIC TRANSPORTATION	5
Introduction	5
History of Electric Transportation	7
Electric Public Transit Today	9
Electric Vehicles (EVs)	15
HYDROGEN FOR TRANSPORTATION	21
Introduction	21
Hydrogen through History	23
Hydrogen in Industry	24
Hydrogen as an Energy Currency	26
Hydrogen in Transportation Systems	31
Glossary	34

© Minister of Supply and Services Canada 1986
Cat. No. M27-74/2-1986E
ISBN 0-662-14866-5

ELECTRIC AND HYDROGEN-POWERED TRANSPORTATION

PREFACE

In the years to come, Canada's transportation system will be changing as our conventional oil reserves are gradually depleted. The transition will be gradual, and for many years most of our vehicles will continue to run on petroleum-based fuels. As Canada moves into the twenty-first century, however, nonpetroleum sources of transportation energy will become more important.

Two of these, electricity and hydrogen, are discussed in this booklet. Some of our public transportation vehicles, such as subways and streetcars, already run on electricity, and electric batteries provide the starting power for our vehicle engines. Few of us encounter hydrogen in our day-to-day life, yet it has important uses in industry and in petroleum refining, and it is already used as a rocket fuel.

Electricity and hydrogen are attractive sources of transportation energy for several reasons — both can be produced from a variety of energy sources, renewable and non-renewable, and produce much less pollution than conventional fuels. Although many urban areas have electric mass transit systems, there are still some problems with using electricity or hydrogen in individual vehicles. Researchers in Canada and elsewhere are working to solve these problems, but it will probably be many years before electric vehicles are a common sight, and even longer before hydrogen becomes a familiar transportation fuel.

This booklet is divided into two sections. The first deals with electricity, an energy source we are already using, and the second covers hydrogen, an exciting 'fuel of the future'.

ELECTRIC TRANSPORTATION

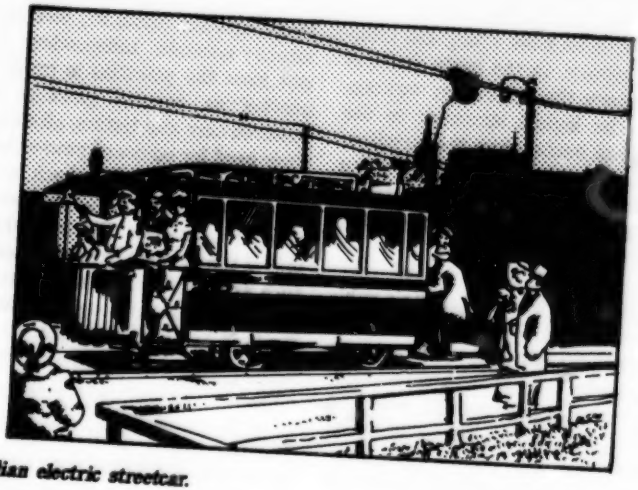
INTRODUCTION

Electric vehicles have a long and interesting history. In the early years of this century, the electric car was considered to be the logical successor to the horse, much more useful than the gasoline-powered car of the day. Electricity is an attractive source of energy for transportation uses because of its potential economy, dependability and efficient operation.

Two quite different types of electric vehicle systems are discussed in this booklet. The first is the mass transit system: streetcars, trolley buses, trains and urban light rail vehicles. These systems follow a fixed route and obtain electric power from a permanently installed wire or rail. The second type, independent electric vehicles, are self contained and carry a battery which provides electricity on demand. Each type of vehicle is oriented to a specific transportation need.

Electric mass transit systems are almost exclusively used for urban transportation, although there is renewed interest in intercity electric service in Canada; in Europe, Japan and the U.S.S.R., electric trains are already common. Independent electric vehicles have the potential to provide the same service as current gasoline and diesel-powered cars and trucks, although at present their need for on-board power storage or generation is a major drawback because of the considerable weight and low power capacity of today's batteries. Electric vehicles are limited at the moment to specialized applications such as forklift trucks and short-distance personal vehicles, although in some countries, England being an example, electric vehicles such as delivery vans are in more widespread use.

Both electric public transit systems and independent vehicles are the subject of continuing research and development. As the price of conventional liquid fuels rises, systems that are independent of petroleum-based fuels may become more important. In the following chapters we shall look at the roles that electricity plays in our transportation system and at the possible roles it could play in the future.



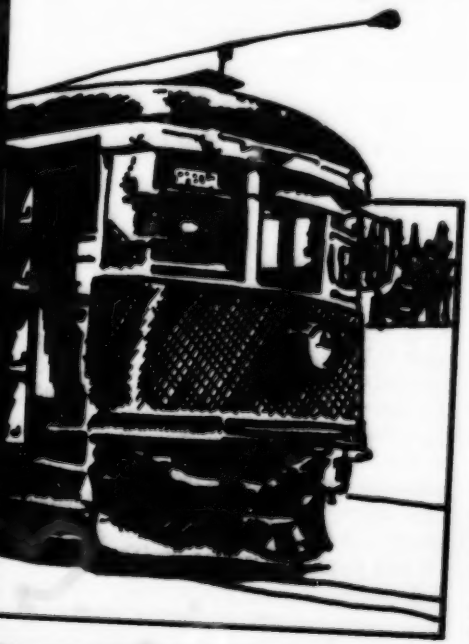
An early Canadian electric streetcar.

Electric railway cars like this one were used in the Niagara – St. Catharines – Toronto Railway until the late 1950s.

HISTORY OF ELECTRIC TRANSPORTATION

The story of electric transportation in the past is primarily one of public rather than private transportation. A private car could be powered only by a cumbersome battery, but public systems could be fed from main electricity systems and take advantage of the bulk supply of electricity. As electricity became more widely available in the later 1800s, urban electric public transportation systems spread throughout Europe and North America.

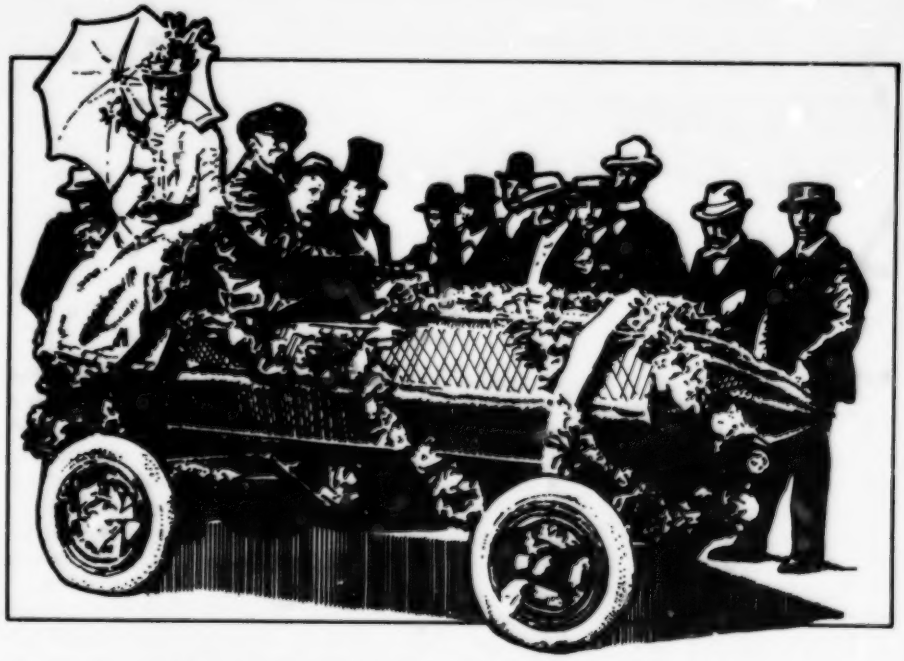
The first electric vehicles were streetcars, not much larger than the traditional horse-drawn cars they resembled. Later, larger streetcars consisting of many units linked together appeared on the scene. In 1890 a dramatic further innovation occurred when the world's first underground electric railway, or subway, opened in London, England. Canada's first subway system was built in Toronto in the early 1950s, and construction of the Montreal 'Metro' followed a decade later.



The first Canadian electric passenger railway was built much earlier, in 1884, at the Toronto Agricultural Fair. By the 1920s, nearly fifty Canadian towns and cities had street railways, but enthusiasm began to wane as private automobiles and diesel-powered buses became more common. By 1965, Toronto was the only Canadian city that still had an operating streetcar system. Ironically, Toronto's streetcar system proved to be advantageous when diesel prices skyrocketed in the 1970s.

At the turn of the century, trolley buses — similar to streetcars, but trackless — were introduced in Germany. Their popularity spread, and by World War II several Canadian cities had trolley bus systems. After the war there was a general move to the suburbs, and the gradual rise in electricity prices made it uneconomical to extend trolley service. However, there are still several hundred trolley buses operating in Vancouver, Edmonton and Toronto.

Intercity electric railway lines were also built in many parts of Canada. These systems led to the birth of commuting, by making it possible for a worker to live some distance from the downtown area, and also gave the



La Jamais Contente: the first automobile to travel faster than 100 km/h.

rural population easy access to town for the first time. But again, the rise in popularity of the automobile and the increasing amount of hard-surfaced road after World War II meant that no further interurban construction was carried out. The last intercity line, the Niagara – St. Catharines – Toronto Railway, ceased operation in 1959.

The popularity of private electric road vehicles also waned in the early years of the twentieth century. The 1880s and 1890s were the heyday of these vehicles, and experimental models were produced in England, France and the United States. Testing of the English vehicles was hampered by the Locomotive Act, which restricted road speed to 6 km/h and required a man with a red flag to walk in front of the vehicle, but other countries were not so cautious. By 1899 *La Jamais Contente*, an unconventional Belgian electric vehicle with an aluminum body, had become the first automobile to travel faster than 100 km/h and in the United States, by the early 1900s, an estimated one third of all vehicles were electric.

During the first two decades of this century the variety of electrically powered commercial vehicles was considerable — from delivery vans to fire engines. They were easier to operate and quieter than the early, often unpredictable gasoline-powered vehicles. But the popularity of electric vehicles did not last. The invention of the self-starter, allied with improvements in petroleum refining, began to tip the balance in favour of the internal combustion engine. Though electric vehicles were regarded as the most advanced, they were expensive to manufacture and to operate and their range was limited to 25 km before the battery needed recharging. By the time automobiles came into mass production, gasoline, a fuel with a high energy content per unit weight and volume, was the preferred fuel.

ELECTRIC PUBLIC TRANSIT TODAY

Urban public transit currently accounts for 5 per cent of all the diesel fuel used in Canada. Finding a satisfactory alternative source of energy for mass transportation would not only conserve our reserves of petroleum-based fuels, but would at the same time set a good example to the rest of the transportation sector.

There are two ways to move people in large numbers. Buses and other free-running vehicles can operate on an urban road network but must, of course, share it with other traffic, a major drawback in the downtown core. The alternative is to move the vehicle along a track or some other sort of guideway that is partially or entirely separated from the road system. This type of system lends itself well to electric propulsion, either alone or in combination with another energy source.

The advantages of electricity for public transit remain the same as they were decades ago. The most important of these is the high and instant torque or turning force of an electric motor, which means that maximum drive power is immediately available. Electric vehicles can thus achieve a high acceleration rate, making them ideally suited to the stop-and-go requirements of a mass transit system. In addition, their efficiency of energy use reaches 90 to 95 per cent, compared with 25 to 30 per cent for conventionally fuelled systems.

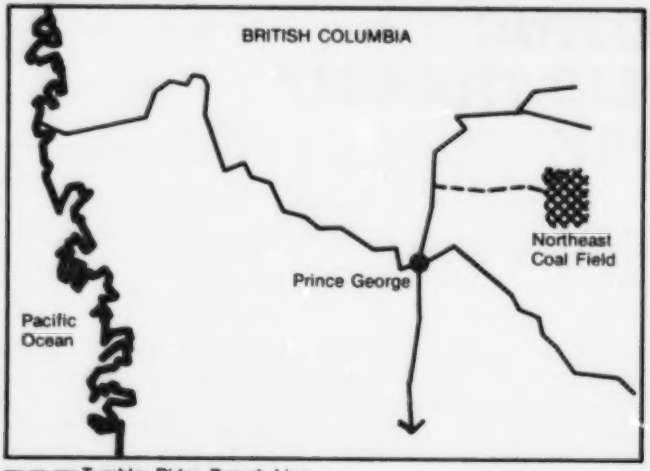
In order to have a significant impact on urban travel patterns, a public transit system must allow the passenger to travel door-to-door in a time and at a cost competitive with the private automobile. The passenger must have easy access to a boarding point and vehicle service to that point must be frequent and regular. Passengers must be able to reach their destinations directly and rapidly. This is all becoming more difficult to do with a buses-only system, as increasingly congested roads play havoc with scheduling.

As a result, local distribution or 'feeder' bus lines allied with fast electric transit to the central business district are becoming popular in North America. This pattern is already established in many European countries, where electric transportation was not abandoned to the same extent as in North America. Such arrangements demonstrate that electricity does not always compete with petroleum-based fuels, but can complement them.

How Electric Transit Works

Any electrically powered transit system has four components: a propulsion system, power conditioning equipment and a current collector within each vehicle, and an overall power distribution system.

- The *propulsion system* comprises all the equipment needed to move the vehicle, such as motors and gears. An electric motor is simply a device which converts electricity into mechanical power. There are various kinds, but the type used to propel a vehicle is the direct current or dc motor.
- The *power conditioning equipment* includes equipment such as transformers, which control the motor power and speed.



The Tumbler Ridge branch line. Canada's first modern electric railway will serve the developing coal-mining area of central British Columbia, joining B.C. Railway's main line at Anzac.

- The *current collector* connects the vehicle to the track power distribution system. Power can be supplied via an overhead wire or, as with subways, through a 'third rail' mounted below or beside the vehicle.
- The *power distribution system* is a network of power cable and track distribution that provides power to the whole system.

Power is taken from the main hydro station to a substation, where it is usually converted to direct current and connected to the track distribution system. The current collector takes power from this distribution system and feeds the propulsion system. (In the case of 'third rail' systems, power is supplied to an electrified rail alongside the track and the current collector picks up the power from this rail.) Finally, the motor converts the current to mechanical power to move the vehicle.

Electric Railroads

Electric railroads are common in Europe, Japan and the U.S.S.R., and interest in railway electrification is developing in Canada. Although the capital costs are high, railway electrification provides independence from petroleum fuels. The first Canadian demonstration of a modern electric railway is taking place in British Columbia with the support of the federal and provincial governments. B.C. Railway's new Tumbler Ridge branch line carries coal destined for Japan from mines in the northeast of the province to a new deep-sea export terminal near Prince Rupert. The 130 km branch line, which cost $400 million to build, traverses mountainous, uninhabited terrain.

Experience gained from the Tumbler Ridge line could encourage electrification of more of Canada's rail network. A high-speed system using overhead wires has already been studied for use in the Toronto–Ottawa–Montreal corridor.

Rapid Transit

Dynamic developments are occurring in the area of electric urban rapid transit. These systems fall into three general categories: conventional light rapid transit, advanced light rapid transit and heavy rapid transit.

Conventional light rapid transit (LRT) operates on either a shared or exclusive right-of-way and usually receives power via an overhead wire. The rails complete the circuit.

The oldest type of light rapid transit vehicle is the traditional trolley car. Its popularity has declined over the years, but new more energy-efficient LRT systems are becoming increasingly popular around the world.

Several cities in Canada have LRT systems. Calgary and Edmonton installed European-designed LRT systems during the 1970s, and Toronto revitalized parts of its aging streetcar system using a new streetcar developed by the Urban Transportation Development Corporation Ltd. (UTDC). This Canadian corporation is a world leader in urban light rail transit technology and manufactures automated light rapid transit vehicles with a number of innovative features.

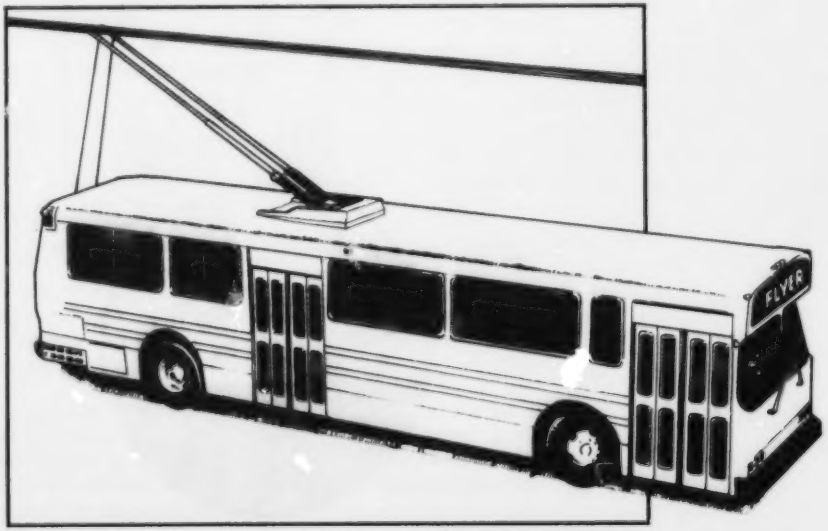
The UTDC cars are very lightweight, with welded aluminum frame and skin and glass fibre ends. They are relatively small (about the size of a standard city bus) and can be used singly or linked together to form trains. The track, which can be elevated, at grade or underground, is narrow and unobtrusive, and the cars are designed to give a smooth, quiet ride, particularly around curves.

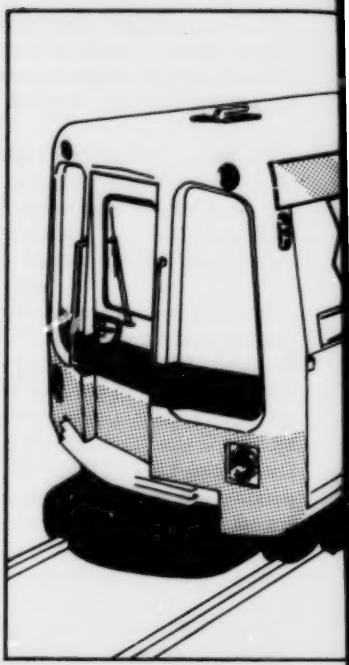
The UTDC light rail cars are also being used in the first fully automated or advanced light rapid transit (ALRT) system in Canada, part of B.C. Transit's Vancouver Regional Rapid Transit System. The ALRT system links up with diesel and trolley bus feeder routes and serves a ferry terminal on the waterfront.

Heavy rail transit (HRT) may take the form of a subway or an aboveground commuter rail system. HRT systems operate in a manner similar to that of rail service, with a number of cars linked together forming a train. The Montreal and Toronto subway systems are examples of HRT.

Electric mass transportation is being actively pursued in Europe, North America, Asia and Australia. Light rail, in particular, is attracting attention in the United States as a means of revitalizing aging public transport systems and as a new market for

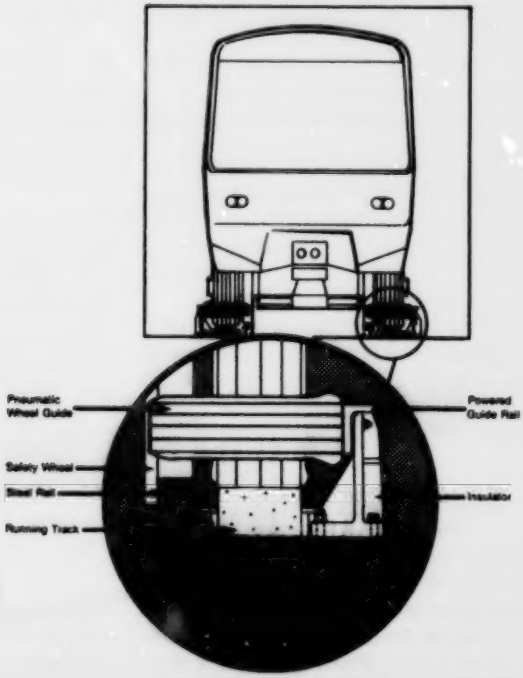
A modern rubber-tired trolley bus. The word 'trolley' comes from an early current collection device called a 'troller'.





One of the UTDC vehicles being used in B.C. Transit's new ALRT system.

A typical subway car and running track in the Montreal 'Metro'.



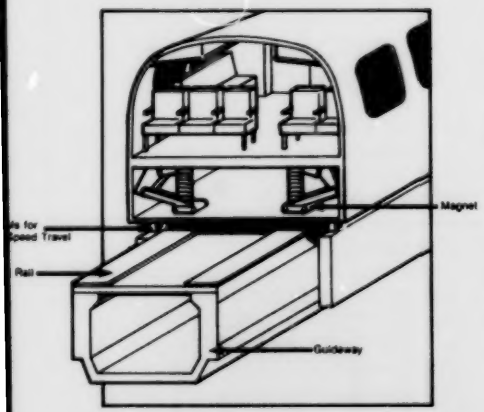
aerospace manufacturers who have the skills to build these systems. LRT systems can be upgraded incrementally, without a great deal of expense, to keep pace with urban expansion.

Electric Mass Transit in the Future

As petroleum reserves are limited, researchers are working to improve the efficiency and cost-effectiveness of electric transportation systems. Some are looking at ways to combine electricity with other forms of motive power — trolley buses with an auxiliary battery, fuel cell, diesel engine or flywheel, for instance — while others are developing more efficient electric drives.

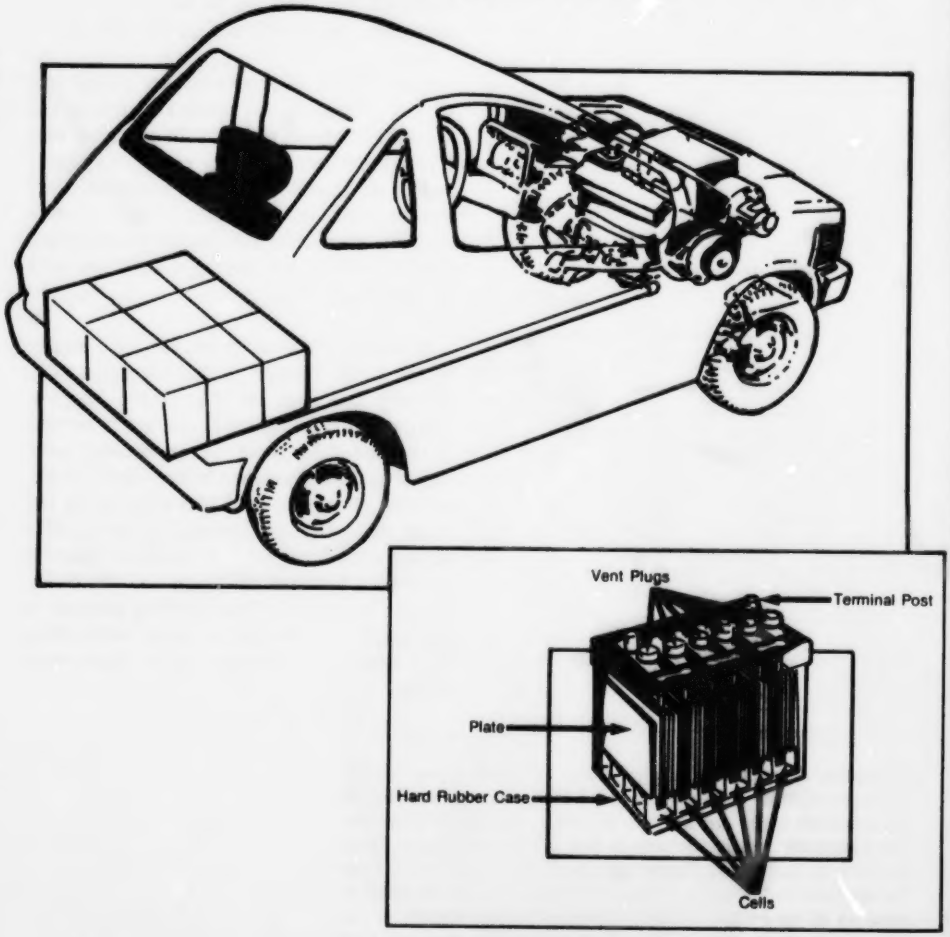
A number of pilot projects are under way to test flywheels in streetcars, buses and trains. Flywheels work on the principle that a rotating wheel will store energy efficiently as long as friction is kept to a minimum. They can be used, for example, in 'regenerative braking', recovering the energy normally lost during braking and storing it until the vehicle accelerates again.

In the years to come we can also expect to see rapid changes in rail transportation. Already the first short distance 'maglev' (magnetically levitated) trains are in service in the United Kingdom. These vehicles make use of an idea developed before World War I. A railway car can be lifted slightly off the track and propelled forward by means of a strong electromagnetic force. Since there is no contact between the train and the track, friction is avoided. This prevents damage to the track, a potential problem with other high-speed rail vehicles (even lightweight ones).



Conceptual diagram of a 'maglev' train. The train is propelled by a linear induction motor; as its speed increases, the magnets on the underside of the cars act like the moving armatures of an electrical generator, causing currents to flow in the metal strips. These currents, in turn, build magnetic fields of their own, which repel the magnets on the train. In this way, the train can be lifted as much as 20 cm off the ground. If the train drifts slightly to one side, as it will on a curve, the repelling magnetic forces on that side of the pathway will become even stronger, thereby edging the train back to its proper position.

A small electrically powered car suitable for urban use. The batteries are located in the rear portion of the vehicle.



In a typical automobile lead-acid battery, six cells are connected in series to produce a total voltage of 12 V.

ELECTRIC VEHICLES (EVs)

How an EV Works

The drive system of an electrically powered over-the-road vehicle is made up of the battery and a controller. The battery uses a chemical reaction to produce electricity — in effect, it stores power not as electricity, but as chemical energy, which can be converted to electricity as needed. The controller regulates the flow of power from the battery and allows the driver to control the speed of the vehicle.

Some conventional automobiles have been converted to electric operation by replacing the internal combustion engine and fuel system with a motor powered by several car type batteries located in the engine compartment and in the trunk. However the extra weight and relatively low energy storage of these lead-acid batteries limit the driving range of the vehicle to 50 km to 60 km.

The batteries in an EV, which are 8 to 16 in number, are usually positioned in or under the vehicle. The weight of the battery pack is an important design consideration, since it contributes 35 to 40 per cent of the total weight of the vehicle while providing a range of only about 60 km; by contrast, the engine

HOW A LEAD-ACID BATTERY WORKS

The lead-acid storage batteries used in today's cars are similar to those capable of powering an EV. These batteries consist of several identical cells, each with positive and negative electrodes or plates immersed in a conducting liquid called the electrolyte. The positive plate is made of lead dioxide, the negative plate of pure lead and the electrolyte is a mixture of sulphuric acid and water. The plates are insulated from one another by separators made of a nonconducting material such as porous plastic, and the cells are enclosed in a rubber or plastic case. Each fully charged cell provides 2 V, so a 12 V battery contains six cells. In an EV a number of batteries are connected together in series to achieve the total voltage required (usually about 120 V).

When the motor is switched on, a chemical reaction begins in the cells, causing electrically charged particles to move through the electrolyte. The current flows from the negative electrode through the motor, back into the cell through the positive electrode and through the electrolyte to the negative electrode to complete the circuit. Passage of the current causes the lead and acid to react together chemically to form lead sulphate and water. This has two effects: the water dilutes the electrolyte and the lead sulphate gradually forms a coating on the plates, preventing any further reaction. In a rechargeable battery, current may be passed in the opposite direction. This causes further chemical reactions that reverse these effects, breaking down the lead sulphate and depositing new lead dioxide and pure lead on the plates and forming more sulphuric acid. The energy required to perform these reactions is stored until the cell is discharged again and the chemical energy is once more converted to electric power.

and fuel system of a conventional gasoline-powered vehicle contributes about 25 per cent of the total weight and provides a range of at least 300 km.

Batteries are rated according to a number of different characteristics. The first of these is *battery capacity*, which is measured in ampere hours, and refers to the amount of current a battery is capable of producing in a given time. A battery rated at 80 A.h, for example can produce 20 A for 4 hours or 10 A for 8 hours. Battery capacity is much lower in cold temperatures; at -18°C, the capacity of a lead-acid battery is only 40 per cent of its capacity at room temperature.

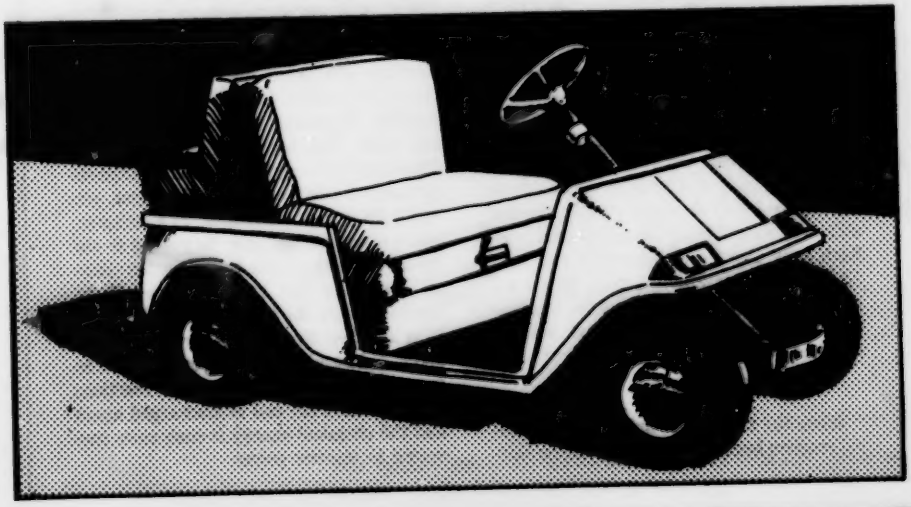
The *power density* of a battery, expressed in watts per kilogram of battery weight, is a measure of the amount of power available at a given time under optimum conditions. It determines the top speed of a vehicle and how rapidly it can accelerate. The total amount of power a lead-acid battery can produce depends upon the rate at which it is discharged; this, in turn, depends on the speed at which the vehicle is driven. If the battery is discharged over a period of one hour, it will deliver 100 per cent of its capacity. If the vehicle travels faster and the battery is discharged in only 20 minutes, it will deliver only 40 per cent.

The amount of usable energy a battery can produce over a given period of time relative to its own weight is called the *energy density*. This is measured in watt hours per kilogram (W.h/kg) of battery weight. Present lead-acid batteries are rated at about 30 W.h/kg, which is rather low and limits the range of current EVs.

The *operating cycle* of a battery refers to the number of times a battery may be discharged or drained of 80 per cent of its energy. (Draining a battery to more than 80 per cent of its discharge depth reduces its life significantly and is not recommended.) A lead-acid battery is rated at 400 cycles.

The most popular storage battery has always been the lead-acid battery, first developed in France in 1859. Of the various types available, two are used for vehicles: the SLI (starting, lighting and ignition) battery and the traction battery designed for use in golf carts. The SLI battery is designed for high power output over a short period at a wide

An electric golf cart. Similar vehicles powered by golf cart batteries are used as airport baggage or passenger carriers and in other low-speed, short-range applications.



range of temperatures. As its name indicates, it is used for starting internal combustion engines. The golf cart battery is capable of high output over a longer period and has a life of 200 to 400 operating cycles. Apart from its longstanding use in golf carts and forklift trucks, this battery is light enough to use in automobiles and light trucks and it powers even the latest generation of EVs. However, power output remains a problem.

The key to marketable EVs, whether private automobiles or commercial trucks, lies in developing batteries with improved energy storage capacity. The battery must be capable of storing and supplying sufficient energy for the required driving range and for extra demands like acceleration and hill climbing at reasonable cost. Today's lead-acid batteries are very heavy and are incapable of storing enough energy to enable the EV to perform as well as a conventionally fuelled vehicle. In addition, most types of storage battery work less efficiently when they are cold and thus require heating and insulating in a climate like Canada's. Improvements in battery life would also increase the competitiveness of electric vehicles, as the costs of replacing batteries can be significant.

More advanced batteries are being developed in many parts of the world, including Canada. They will be lighter, more powerful, longer lasting and eventually perhaps more economical than the lead-acid battery. The nickel-zinc battery, based on a type first developed in the 1930s, weighs less than half as much as a lead-acid battery, but is able to deliver the same amount of usable energy. Since excess battery weight reduces vehicle range, the nickel-zinc battery has the potential to increase the range of EVs. However, it is expensive to manufacture and has a short life span when used in vehicles. Canadian research is under way to develop better batteries and reduce energy and manufacturing costs.

The nickel-iron battery is another alternative. It gives a vehicle greater range than the lead-acid type, but is able to store only 50 to 60 per cent of the energy from the recharging current, compared with 75 per cent for the lead-acid battery.

In the future, high-temperature batteries may be commercially available. These could extend the range of a vehicle to more than 300 km on one charge. These batteries are unusual in that the electrodes are liquid, and to keep them in this state an operating temperature of about 350°C is needed. The electrolyte is a solid, usually ceramic or glass. In theory, these batteries have a high energy density, but they require more development before they can be commercialized. However, they have already been successfully tested in prototype vehicles which reached speeds of more than 100 km/h and travelled more than 150 km on a single charge.

The sodium-sulphur battery is the most promising of the high-temperature traction batteries currently under development. It will store up to five times the energy of a lead-acid battery per unit weight and has the advantage of using abundant, inexpensive materials. In addition, it forms a sealed system, making it maintenance-free. However, this type of battery must be kept heated.

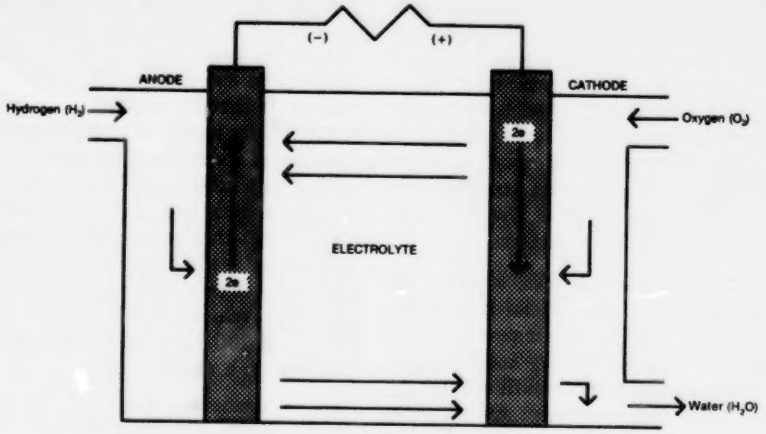
Fuel Cells

A fuel cell operates much like a battery but, rather than being charged electrically, it is powered by fuel. The fuel is oxidized with the aid of a catalyst, a substance that speeds up a chemical reaction but remains unchanged itself. The energy that is released during this reaction is made available directly as an electric current. Unlike a conventional battery, a fuel cell will continue to operate as long as fuel and oxidant are available.

The most common fuel cell is powered by hydrogen and oxygen. The 'electrodes' are in the form of hollow metal chambers, one filled with hydrogen and the other with oxygen. The electrolyte is contained in a porous ceramic electrolyte holder that is designed to keep the gases apart but to bring them in contact with the electrolyte.

The reaction that takes place in the fuel cell can be represented as follows:

$2H_2$	+	O_2	→	$2H_2O$	+ electricity
hydrogen		oxygen		water	



A hydrogen-oxygen fuel cell. A layer of phosphoric acid is sandwiched between two electrodes: the cathode (negatively charged) and the anode (positively charged). A hydrogen-rich gas passes over the negative electrode and the positive electrode is exposed to an oxygen-rich gas. The hydrogen gas is split into hydrogen ions (positively charged hydrogen atoms) and electrons at one electrode with the help of a catalyst such as platinum. The hydrogen ions pass through the electrolyte towards the oxygen. The electrons flow through an external circuit towards the oxygen where they chemically react with the hydrogen ions and the oxygen to form water. The movement of the electrons through the external circuit creates a direct or dc electric current.

Since the only byproduct of the reaction is water, the device is completely nonpolluting. The main drawback in vehicle use would be the problem of safely and cheaply supplying the hydrogen, which would have to be in liquid form. The oxygen could easily be obtained from the surrounding air. An alternative is to use hydrocarbons like natural gas, methanol or gasoline as sources of hydrogen. Fuel cells have the potential to provide greater energy conversion efficiency than conventional engines.

Today's EVs are limited mainly by present battery technology and the high cost of batteries. Since the cost of vehicle parts is roughly the same for EVs and conventionally fuelled vehicles, the additional cost of a battery and passenger heating system must be offset by lower operating and maintenance costs if EVs are to become attractive to the consumer. However, although the cost-effectiveness of EVs needs improvement, they still offer other major benefits, particularly their quiet, nonpolluting operation.

EVs are currently used primarily in off-the-road applications, mainly where noiseless and pollution-free operation are important and limited range is not. Electric forklifts have been on the industrial scene since the 1930s. Battery weight is an advantage rather than a drawback since this type of vehicle needs heavy ballast to balance the load. Airport baggage transporters and personnel transporters, like golf carts, are more recent versions of this type of vehicle; in the United Kingdom, milk delivery vans represent another application.

It remains to be seen whether EVs enter the personal vehicle market in the form of a conventional four-passenger automobile or as a one- to three-passenger microcar. The first major market for a regular-sized automobile is likely to be taxi fleets. A taxi is a largely

urban vehicle, required to cover a limited area. A conventional taxi spends a good deal of time with its engine idling, wasting fuel and adding to air pollution.

The microcar is another concept under development by several companies in Europe and North America. It has not yet reached the stage of commercialization, and is not expected to become competitive with its conventionally fuelled counterpart until the 1990s. The electric microcar generally has a top speed of 60 km/h and a range of 40 km to 80 km between charges. This restricts it to urban use, particularly commuting. Though microcars are accepted in Europe, changes in vehicle certification and safety regulations would be needed before they could be used on North American roads.

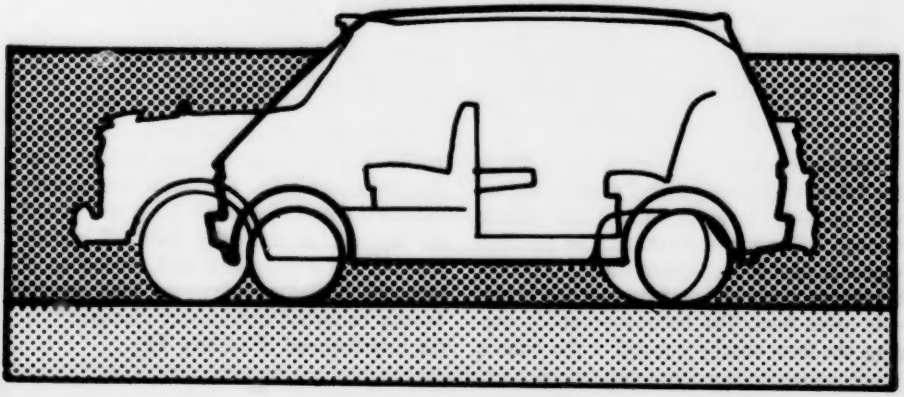
In the short and medium term, at least, urban utility vans offer the best market for electric power. Commercial fleets use central maintenance and scheduling and are usually required to cover only a limited area. They can therefore accommodate the restricted range and performance of EVs. As well, since conventional delivery vehicles use considerable amounts of fuel in stopping, starting and idling, fuel costs are a major contributor to operating costs. A fleet operator is more likely to accept a higher purchase price in return for lower operating and maintenance costs.

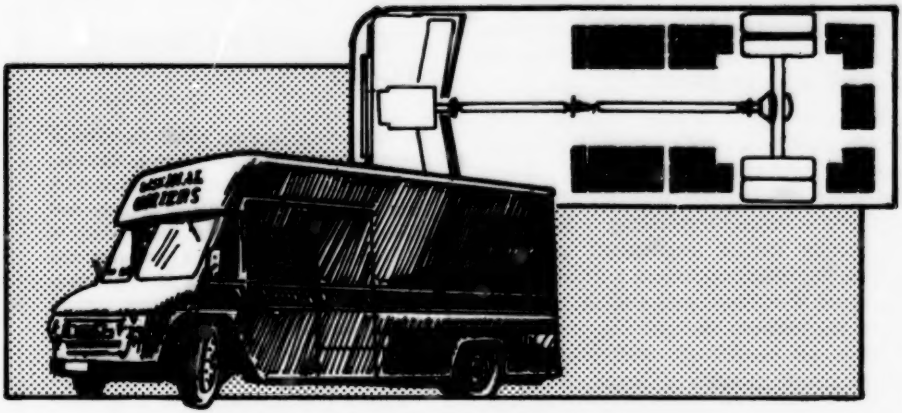
THE LUCAS ELECTRIC TAXI

In the United Kingdom, where the price of petroleum fuels is higher than in Canada, there is considerable interest in electric vehicles. Lucas Chloride (a merger of Lucas and Chloride, two companies in the forefront of EV technology in Britain) is developing and manufacturing components for a growing number of EVs. The Lucas Electric Taxi, in production since the mid-1970s, uses state-of-the-art lead-acid battery technology. Designed for use in London, it has to meet stringent requirements: great manoeuvreability and a range of 80 km to 100 km per day on very crowded streets.

The Lucas taxi retains some of the traditional features of a London taxi, including a luggage compartment beside the driver and a glass partition with a communication vent between driver and passengers. The body is constructed of steel with an exterior coating of glass fibre reinforced plastic. The total weight of the vehicle is 2250 kg, of which 40 per cent is the weight of the battery pack. This is loaded from beneath and carried at chassis level, which ensures that the vehicle's centre of gravity is kept low and that battery exchange is easy and rapid.

A Lucas electric taxicab compared with a conventional London cab. The Lucas taxi is small and more manoeuvreable, but retains many of the features of the traditional London cab.





The Chloride 'Silent Karrier' van has a conventional exterior — it's what you don't see that makes it unique.

THE CHLORIDE 'SILENT KARRIER' VAN

The Chloride 'Silent Karrier' delivery van, which came into production in the United Kingdom in 1977, was the first vehicle to be made available under the 'London Goes Electric' scheme. Developed in collaboration with Chrysler U.K. and National Freight Corporation, the vehicle has a Dodge body and chassis and is powered by Chloride's specially designed battery, which has increased energy density. Energy efficiency is also improved by the use of regenerative braking. The 160 V lead-acid battery pack is located beneath the cargo area. There is also a 12 V auxiliary battery. The van seats one person and carries a payload of slightly more than 1500 kg. Its top speed is 64 km/h and it can travel 64 km between charges.

Another interesting variation of the EV is the hybrid vehicle, in which a gasoline engine and an electric motor drive the vehicle through a common driveshaft. The gasoline engine is used to supplement battery capacity, to improve range and performance and to provide cabin heat. The battery normally supplies the base energy demand of the vehicle and the auxiliary device is used to meet extra demands, for example for hill climbing. Research versions of hybrid vehicles have been made and assessed but it has been found that, at present, the cost of the gasoline engine and the complicated control system offsets the gain in vehicle range.

The Future of EVs

The long-term market for EVs will depend upon a number of factors: the role of transportation in our future lifestyle, the importance of environmental issues (particularly air pollution and noise) and the availability and cost of conventional fuels. In the near term, EVs are not expected to compete directly with conventional vehicles; they will probably continue to meet specialized needs where their current high cost and limited range are offset by particular advantages.

More energy-efficient batteries and convenient battery exchange stations for fleet vehicles are needed before EVs can be successfully commercialized. Canadian EV research and development is currently directed mainly towards the development and evaluation of batteries (including advanced high energy density batteries) and battery chargers, and the improvement of battery life.

HYDROGEN FOR TRANSPORTATION

INTRODUCTION

Hydrogen (the chemical formula for which is H_2) is the lightest, most abundant element on earth. A colourless, odourless and tasteless gas, hydrogen may seem to be an ideal fuel because it burns readily and cleanly. However, pure hydrogen does not exist in nature: it is always found combined with other elements.

All the vehicle fuels we currently use are mixtures of hydrogen and carbon, hence the term 'hydrocarbons'. However, pure hydrogen itself can also be used as a fuel to run engines, turbines and other heat-based power sources. The American space shuttle, for example, is fuelled by hydrogen rocket motors. Hydrogen can also be used in fuel cells to power electric vehicles.

Since hydrogen does not occur naturally, it must be produced from other energy sources. Today it is most commonly produced by processing natural gas. However, hydrogen can also be produced by passing an electric current through water (H_2O), a process known as electrolysis. Through electrolysis, electricity produced from any source (moving water, nuclear fission, wind or thermal generation) can be used to produce hydrogen. Other promising ways of producing hydrogen, such as using sunlight to split water, are being researched in a number of countries.

HYDROGEN PROCESS

Hydrogen can be produced from

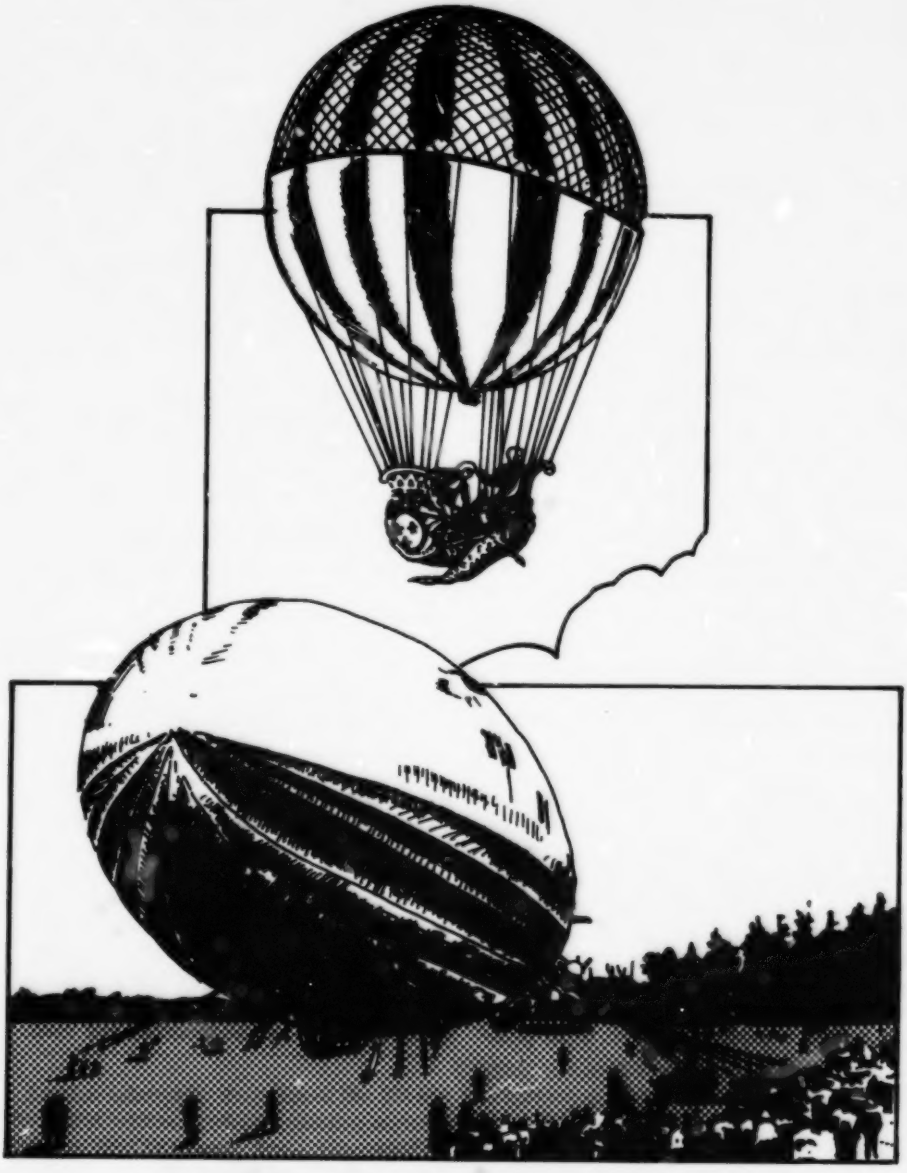
- light petroleum feedstocks, by reforming with steam;
- carbonaceous feedstocks such as coal, by gasification and reaction with steam; and
- water, using electricity generated from either renewable or nonrenewable resources.

And then used to

- produce larger quantities of liquid petroleum fuels;
- run piston engines or turbines; and
- produce electricity by means of fuel cells.

Hydrogen-fuelled vehicles will probably not be a common sight in the near future. In the long term, however, hydrogen has great potential as a transport fuel. In the following chapters, we will look at some of the ways in which hydrogen can be produced and used.

Hydrogen's first use in transportation was as a buoyancy medium in balloons.



The Hindenburg was one of the largest passenger airships of the 1930s. It was 245 m long and 41.2 m in diameter, and came equipped with the most modern conveniences. As well as 25 two-berth sleeping cabins, the giant zeppelin contained a massive dining room and kitchen, washrooms and showers, lounges and a glassed-in viewing deck.

HYDROGEN THROUGH HISTORY

Interest in hydrogen as a transportation fuel is not new. Ever since an English aristocrat named Henry Cavendish discovered what he called 'inflammable air' in 1766, scientists have been exploring the potential of hydrogen.

The earliest use of hydrogen in transportation was simply as a buoyancy medium to create a lighter-than-air vehicle. In 1783 a French scientist, Jacques Alexandre César Charles, made a small balloon of silk coated with a rubber solution to make it airtight, filled it with hydrogen and travelled about 20 km from Paris, coasting about 2 m above the ground. He landed in a small village whose inhabitants were so frightened by the noise and escaping gas that they destroyed the balloon with pitchforks. A few years later, a hydrogen balloon flight was made in the United States.

At the beginning of our own century, German dirigibles — rigid airships known as zeppelins after their designer — carried this idea one stage further, using hydrogen both for buoyancy and as a booster fuel. On long journeys, buoyancy of the ship increased as the primary fuel, usually a benzol-gasoline mixture, was consumed. The unwanted hydrogen was burned as extra fuel. The zeppelins made many successful flights, but the tragedy at Lakehurst, N.J. in 1937 when the *Hindenburg* caught fire, killing 36 people, greatly reduced the enthusiasm for this type of vehicle.

Though the idea of using hydrogen for motive power had been suggested during the last century by several scientists and predicted by Jules Verne in his adventure story, *The Mysterious Island*, it was not until the 1930s that there was serious interest in its use as a fuel. Research began in Europe and America, particularly when difficulties were encountered with conventional fuel supplies during World War II, and continued through the 1940s and 1950s.

Processes for producing hydrogen were already well developed. Hydrogen was first produced by electrolysis of water in 1800 and the process is still used today in places where electric power is inexpensive. In 1873, a method was developed to produce the 'town gas' commonly used at the time for residential heating and lighting. Blowing alternate blasts of steam and air through a bed of hot coal produced a mixture of carbon monoxide and hydrogen. Today, a similar mixture, called synthesis gas, is used in several commercial processes.

Interest in hydrogen gas led to the development of other forms of hydrogen power, including liquid hydrogen and hydrogen-air fuel cells. Liquid hydrogen was first produced by Sir James Dewar, a British scientist, in 1896, and is presently used as a rocket fuel. The first practical hydrogen-air fuel cell, which combined hydrogen and oxygen to produce electricity and water, was developed around 1950. Since then a number of automobile companies have been experimenting with fuel cells.

HYDROGEN IN INDUSTRY

Hydrogen is used in a number of industrial processes, especially the production of liquid petroleum fuels from conventional crude oil and synthetic oils. Many of the processes used to produce the gasoline and other fuels that keep our transportation system running rely on the use of hydrogen.

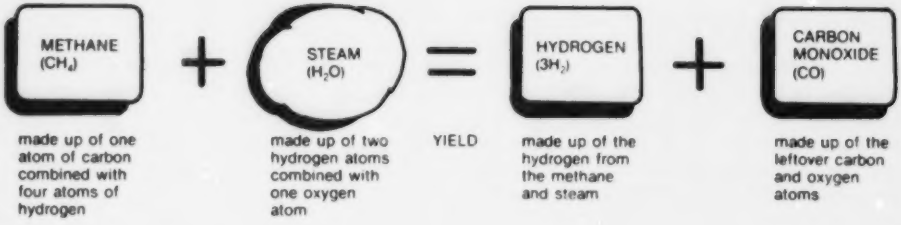
All the hydrocarbon fuels we use are made up of hydrogen and carbon, and the ratio of the two elements determines the type of petroleum fuel that is produced. High-carbon fuels such as tar are made up of large molecules and are heavier and less volatile. On the other hand, hydrogen-rich fuels such as natural gas and propane, being composed of smaller molecules, are lighter and more volatile.

The art of refining petroleum lies in knowing how to juggle these various molecules to produce more of the needed products — chiefly lighter, more hydrogen-rich liquids. By adding hydrogen to heavy molecules through a series of complex processes, refineries can produce lighter molecules. Hydrogen allows the refiner to produce more of the products that are needed and less of those that are not. As Canada's production of synthetic crude oil from carbon-rich resources such as oil sands increases, the importance of hydrogen in refining will grow.

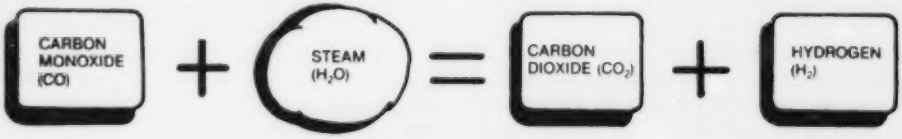
Petroleum refining is not the only industry in which hydrogen plays a vital role. Another major use for hydrogen is in the manufacture of ammonia, an important agricultural fertilizer.

Steam Reforming: The Process of the Present

For both petroleum refining and chemical production, hydrogen is obtained through a process called steam reforming. The most common steam-reforming technique uses natural gas as a raw material. Methane, the primary component of natural gas (about 85 per cent by weight), is reacted with steam at high temperatures to produce a synthesis gas made up of hydrogen and carbon monoxide. Using chemical shorthand (in which C represents a carbon atom and H represents a hydrogen atom) the reaction looks like this.



The synthesis gas is cooled and passed through 'shift reactors', where the carbon monoxide–hydrogen ratio is shifted to produce the maximum amount of hydrogen possible. This is done by reacting carbon monoxide with steam to form carbon dioxide and hydrogen.



Following this, the gas is cooled and then passed through a liquid scrubber and a catalytic reactor to remove the carbon dioxide and any lingering carbon monoxide.

Most of Canada's present hydrogen supply is produced using this process. Through its role in petroleum refining, hydrogen already accounts for almost 2 per cent of our primary energy use. As we shall see in the following chapters, it could play an even more important role in the future.

HYDROGEN AS AN ENERGY CURRENCY

To date, hydrogen has only been extensively used in petroleum refining and in the petrochemical industry (for example, in the production of ammonia and methanol). In the future, however, it could have a broader use as an energy carrier or 'currency', providing a means of storing and transporting energy from a variety of sources.

As noted earlier, hydrogen does not exist naturally on the earth and must be produced from some hydrogen-containing material. Most hydrogen used today is produced from natural gas, but there would be little point in converting natural gas to hydrogen for use as a vehicle fuel. Not only is natural gas an equally suitable fuel, but converting it to hydrogen requires energy.

Electrolysis: Source of Unlimited Hydrogen?

The ultimate source of hydrogen fuel is water, one of the most abundant materials on earth. Water can be split into hydrogen and oxygen by passing an electric current through it in the process known as electrolysis.

In electrolysis, an electric current is passed between two electrodes immersed in a solution of water and an acidic or alkaline electrolyte. This produces hydrogen at one electrode and oxygen at the other. The quantities of each that are produced depend on the size of the electric current between the electrodes and the temperature of the electrolytic solution.

Electrolysis is used to produce very pure hydrogen mainly for the food and pharmaceutical industries, which are willing to pay a premium for high purity. At present, electrolytically produced hydrogen is more expensive in Canada than hydrogen produced from natural gas. Using electrolysis to produce hydrogen would only be economical where electricity was inexpensive and plentiful or where hydrocarbon feedstocks were either unavailable or very expensive.

Currently, there are two main types of electrolyzers in use throughout the world: the unipolar or 'tank' electrolyzer and the bipolar or 'filter press' electrolyzer.

The two types have several common features: a 20 to 30 per cent solution of potassium hydroxide in pure water as the electrolyte; the use of iron as the cathode and nickel or nickel-plated iron as the anode; and the use of an asbestos diaphragm to divide the cell compartments. What distinguishes them is the way the individual cells are assembled and the method of electrode polarization.

In unipolar electrolyzers, the electrodes are alternately suspended vertically and parallel to each other in a tank containing the electrolyte. The electrodes are connected in parallel; thus, each electrode has one polarity relative to the other electrode (hence, the description 'unipolar'). Unipolar cells have two main advantages: 1) few and inexpensive parts are needed, and 2) individual cells can be shut down for repair or replacement simply by short-circuiting two adjacent cells while the rest of the cell series continues making hydrogen. The main disadvantage of current industrial unipolar electrolyzers is their inability to handle very high current densi-

ties and to operate at high temperatures; this inability limits their efficiency.

The bipolar electrolyzer resembles a filter press. The design incorporates a sandwich construction of electrode plates, separator materials and gasket insulators. One side of the electrode plate acts as an anode in one cell and the other side of the plate acts as the cathode of the next cell (hence, the term 'bipolar'). The cells are connected in series. The bipolar electrolyzer has several advantages over the unipolar: it can operate at high current densities, temperatures and pressures, and requires less floor space than the unipolar electrolyzer. However, the bipolar design requires refined manufacturing processes in order to maintain close tolerances, and consequently is inherently more expensive. The other major disadvantage of bipolar units is the greater difficulty in cell maintenance: if one cell component fails, the entire stack has to be dismantled and removed from service for repair.

In an attempt to reduce the cost and increase the efficiency of electrolysis, new types of electrolyzers are being developed. One promising type is the solid polymer electrolyzer, an advanced bipolar system that uses a catalyst. So far, only small-scale commercial plants have used this process, but it has the potential to improve cell efficiency, lower capital costs and improve reliability and safety.

The main advantage of electrolysis is that it can use electricity from any source to produce hydrogen. The disadvantages are its cost and the fact that considerable energy is lost in converting primary energy sources to electricity.

However, many sources of energy, including uranium, wind and falling water, can only be tapped by converting them to electricity. Electrolysis then represents a way to convert this electric energy into a fuel that can be stored for use in a wide variety of applications. The flexibility hydrogen provides, and the fact that it can be stored, are advantages that can offset the energy penalties incurred in its production.

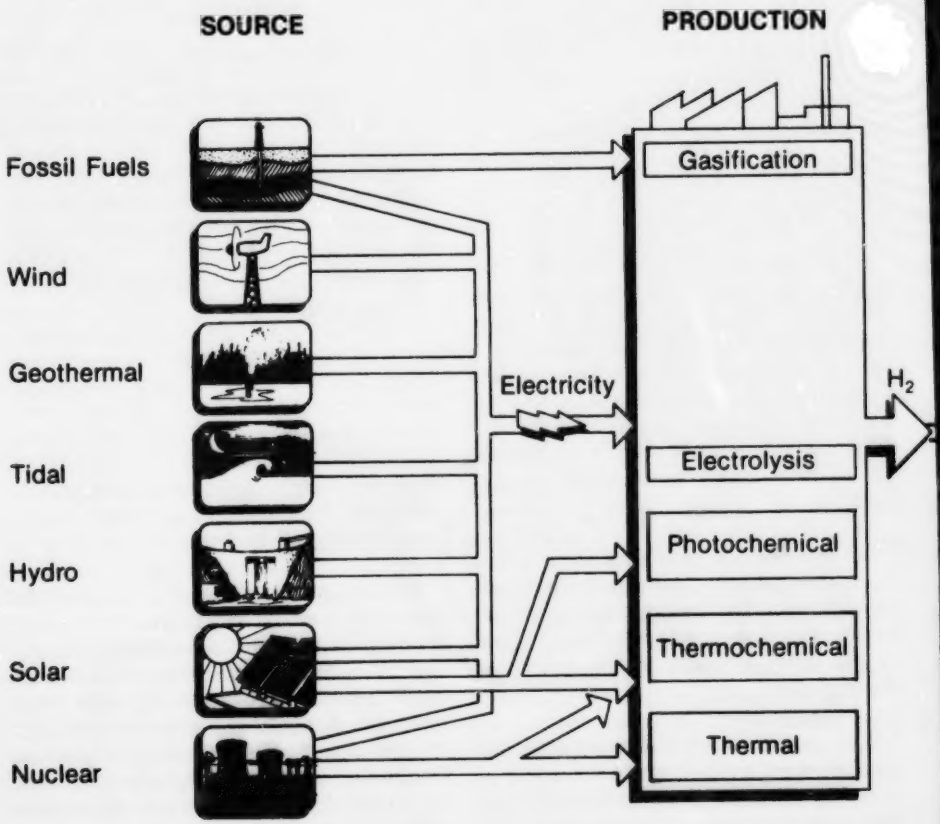
However, the question of cost remains. The cost of producing hydrogen by electrolysis is dominated by the cost of electricity. Today's electricity prices are based on supplying a fluctuating load, which is less efficient (and thus more expensive) than generating power to meet a steady demand. Producing hydrogen from electricity generated during periods of low demand could provide a way to store electricity and thereby increase the overall efficiency of power production.

The 'Hydrogen Economy'

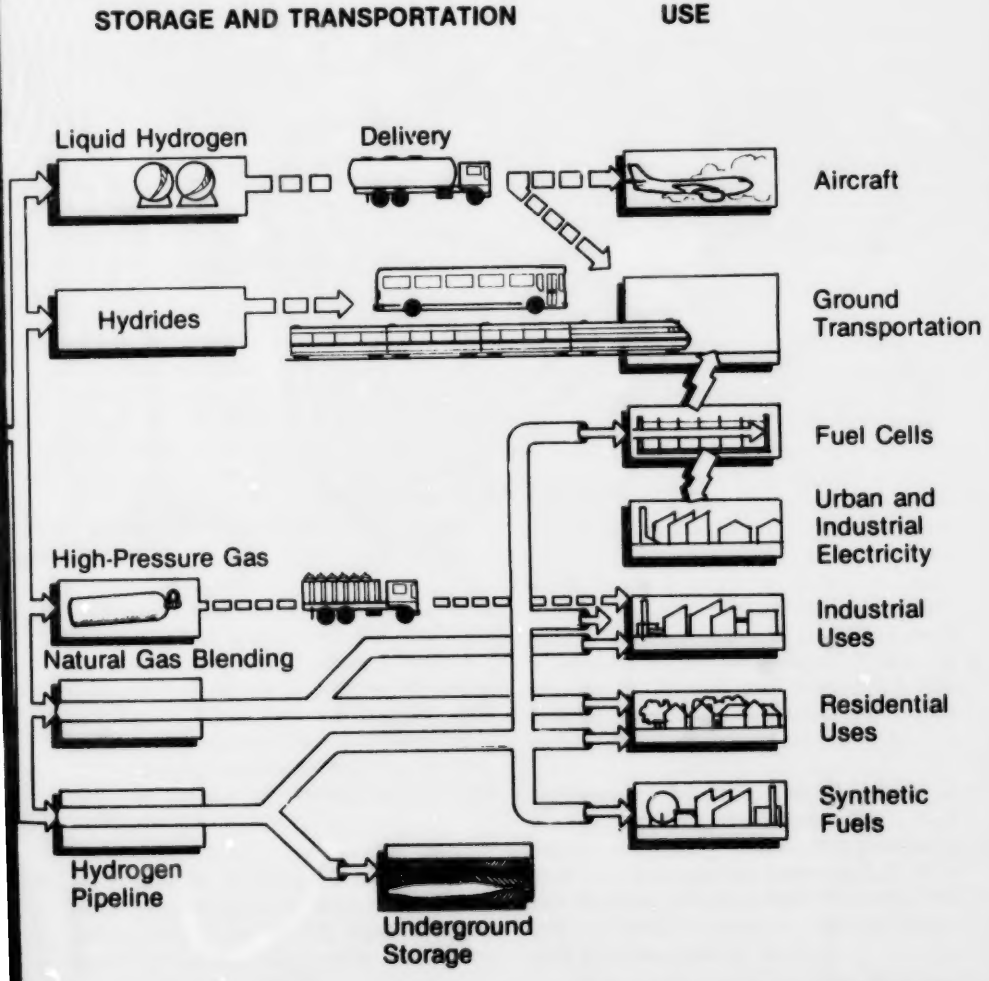
Some researchers envision a 'hydrogen economy' in which electricity from nuclear and renewable sources would be used to produce hydrogen from water by electrolysis. The hydrogen could be stored until needed, transported as necessary and then burned to produce electricity or heat or to power vehicles or machinery.

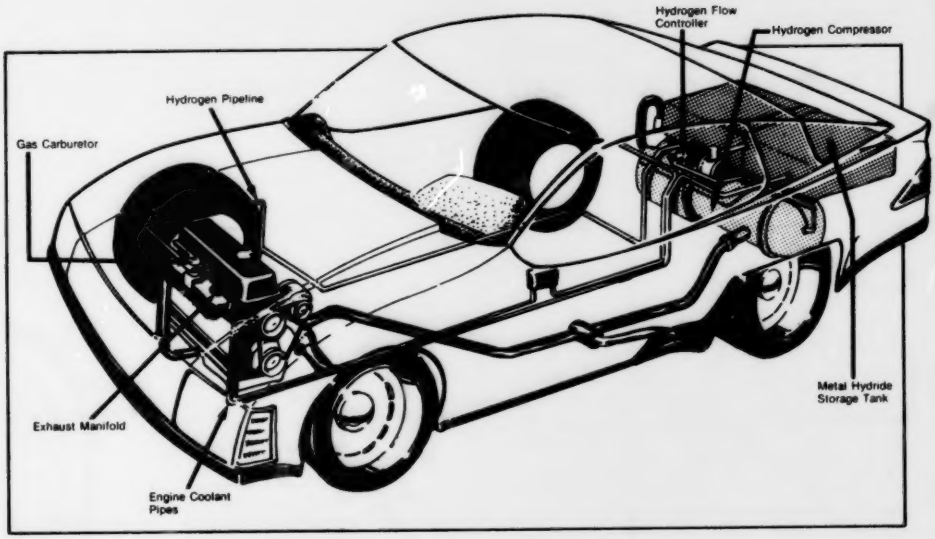
In such an energy system, hydrogen would serve as an 'energy currency', a common energy form produced from many sources and converted into many forms. Hydrogen produced from water could be used to power vehicles or, through conversion in a fuel cell, to drive an electric motor. Such systems are envisioned for the future era when hydrocarbon fuels will be depleted.

While a hydrogen economy is an interesting possibility, it would only be practical if electricity could be produced much more cheaply than other energy forms. At one point, it was hoped that nuclear fission could provide large quantities of inexpensive power, but this has not proved to be the case. At some point in the future, however, the hydrogen economy may be viable, either as a result of increases in the cost of petroleum-based fuels relative to other fuels, or through a breakthrough in renewable energy or nuclear technology.


SOURCE
PRODUCTION
Fossil Fuels
Wind
Geothermal
Tidal
Hydro
Solar
Nuclear
Electricity
Gasification
Electrolysis
Photochemical
Thermochemical
Thermal
H_2

The 'hydrogen economy' concept. Hydrogen could be produced from a variety of sources, stored and used in transportation, as well as other applications.





Artist's conception of a hydrogen-fuelled car.

HYDROGEN IN TRANSPORTATION SYSTEMS

The Storage Dilemma

Hydrogen can be used in vehicles in liquid or gaseous form, either directly as a fuel that is burnt, or to power a fuel cell. As a fuel for direct burning in either piston or turbine engines, hydrogen is attractive because it burns cleanly, producing water vapour as its major exhaust gas.

However, hydrogen is difficult and expensive to store. It will stay in a liquid form only if stored at temperatures below −250°C, and liquefying hydrogen in the first place requires 25 to 30 per cent of the energy contained in the gas. Hydrogen can be stored as a compressed gas, but this requires large and heavy vessels. At a typical pressure of 13.7 MPa (136 times standard atmospheric pressure) hydrogen gas and its steel container together weigh about 30 times more than an equivalent amount of gasoline; 99 per cent of the weight is in the container. The same container takes up about 24 times more space than a container holding the equivalent amount of gasoline.

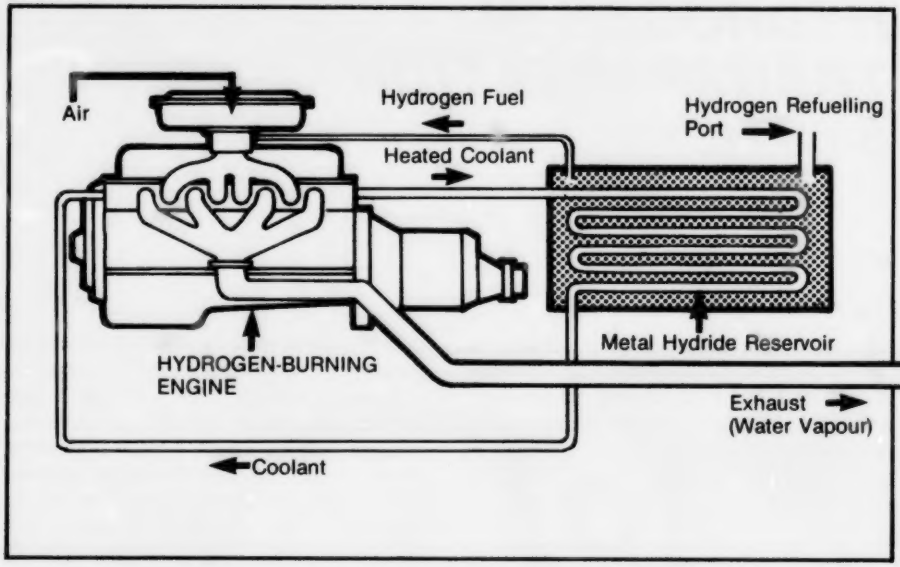
The same problems apply to electric cars powered by hydrogen-air fuel cells. Fuel cells act like electrolyzers in reverse, combining hydrogen and oxygen to produce electricity and water. While fuel cell powered cars would not face the problems of battery weight and recharging common to other electric vehicles, the problem of storing the hydrogen would remain.

The problem of storage is less crucial in larger vehicles such as ships, aircraft and trains. Aircraft powered by liquid hydrogen appear to be technically feasible, and for this application hydrogen's light weight may be an advantage. A conventional aircraft consumes much of its energy taking off with and carrying its own heavy fuel. Since liquid hydrogen contains about 2.5 times the energy per unit weight that conventional jet fuel contains, a hydrogen-powered plane would be able to fly further on a given amount of fuel than a similar plane fuelled by conventional jet fuel, although it would need to carry a greater volume of fuel because of hydrogen's lower density.

Metal Hydrides

The problem of on-board fuel storage will probably prevent the development of hydrogen-powered cars in the foreseeable future. In the long term, storing hydrogen in metal hydrides may be possible. When gaseous hydrogen is brought into contact with certain types of metal, hydrogen molecules are adsorbed onto the surface of the metal and some hydrogen atoms actually penetrate and lodge themselves in the crystals of the metal. Under pressure, a great deal of hydrogen is absorbed and the metal becomes a metal hydride; heat is released during this process. When the pressure is lowered and heat added, the hydride decomposes, once again producing a metal and releasing gaseous hydrogen.

The main advantage of metal hydrides is the fact that they can accommodate a high density of hydrogen. Indeed, it is possible to pack more hydrogen into a metal hydride than into the same volume of liquid hydrogen, and hydrides would be easier to store and transport than the volatile liquid.



This illustration shows how a metal hydride could be used to fuel a hydrogen-powered vehicle. A coolant (water) carries waste heat from the engine through a heat exchanger in the metal hydride reservoir. Hydrogen released from the hydride is piped to the engine, where it is burned to produce power, heat and water vapour.

For the moment, research into metal hydrides is still in the preliminary stages and there are many problems to be solved before a workable metal hydride storage system can be developed. Many years are likely to pass before hydrogen-powered vehicles become a reality.

Economics, Safety and Logistics

While it is probably possible to solve the technical problems of using hydrogen for transportation, the question of economics must be considered. The economic attractiveness of hydrogen is determined by the cost of conventional petroleum-derived fuels. If petroleum prices rise relative to electricity prices, the economics of electrolytic hydrogen will improve. When, or even if, this will occur is difficult to predict.

Questions of safety and logistics must also be dealt with if hydrogen is to be used as a fuel for passenger vehicles. The *Hindenburg* disaster gave hydrogen the reputation of being unsafe for public use; in fact, most of the *Hindenburg* fatalities occurred among those who jumped from the airship before it hit the ground, and were not caused by the explosion or fire. In reality, with proper controls, hydrogen is safer than some of the conventional fuels we use daily in our homes and cars.

Although hydrogen is more flammable than gasoline, burning hydrogen gives off less radiant heat than a gasoline fire. The difficulty of detecting leaks of colourless, odourless hydrogen can be dealt with as it is with natural gas, by adding odorants. Illuminants can also be added to hydrogen to ensure that it burns with a clearly visible flame.

Hydrogen has been used safely in industry because storage and handling are properly controlled. Research into the potential

hazards of hydrogen indicates that, with proper controls and regulations, hydrogen could safely be used as a fuel for passenger vehicles.

The liquid petroleum fuels we currently use to fuel our cars and trucks are brought to us through an efficient distribution and refuelling network, which begins at the refinery and ends at the service station. If hydrogen is to be used as a vehicle fuel, an equally efficient system will have to be developed to transport and distribute it. Safety, user convenience (e.g., speedy refilling, simple operation) and the need for proper metering and storage of the hydrogen at the refuelling facility must all be taken into account in the system design. Three possibilities exist: pipeline distribution of gaseous hydrogen, tanker haulage of liquid hydrogen to refuelling stations — much as gasoline and diesel are now distributed — or on-site electrolysis at the refuelling point.

Obviously, the type of distribution and refuelling system needed will depend on whether hydrogen vehicles are designed to use liquid or gaseous fuel. This, in turn, depends on the outcome of research into on-board vehicle fuel storage. Given so many uncertainties, it is clear that hydrogen will not be a practical fuel for ground transportation for many years, except perhaps in very specialized applications. As oil prices rise, however, and research continues into improving the efficiency of hydrogen production and use, hydrogen may well emerge as the fuel of the twenty-first century.

GLOSSARY

Advanced light rapid transit	Electrically powered transit vehicles that are controlled in an automatic or semiautomatic manner, and which operate on a fully separated right-of-way either as single units or in multiple unit trains.
Alternating current (ac)	An electric current that reverses direction in a circuit at regular intervals, usually 120 reversals or 60 cycles per second.
Ampere hour	Amount of electric current produced by a potential difference of 1 V acting through a resistance of 1 ohm over a period of 1 hour (see Battery capacity).
Anode	The positively charged electrode in a battery, from which the electric current is transmitted to the electrolyte.
Automated light rapid transit	See Advanced light rapid transit.
Battery capacity	Measure of the energy storage capacity of an electric battery. The amount of electric current produced multiplied by the time during which the battery produces current at a fixed voltage (see Ampere hour).
Bitumen	Viscous mixture of hydrocarbons, which occurs naturally but is not commercially recoverable by standard methods. Also hydrocarbon residue from distillation of some crude oils.
Carbon monoxide	A colourless, odourless, toxic gas composed of equal parts of carbon and oxygen. Produced by partial combustion (oxidation) of hydrocarbon fuels.
Catalyst	A substance that helps to initiate a chemical reaction and enables it to proceed under less severe conditions (for example, at a lower temperature or pressure), but remains unchanged itself.
Cathode	The negatively charged electrode of a battery. The point at which an electric current leaves.
Condensate	Mixture of pentanes and heavier hydrocarbons produced from oil or gas wells; gaseous as produced when hot, but becomes liquid on cooling at the surface.
Conventional fuels	Liquid hydrocarbon fuels obtained by refining crude oil.
Conventional oil reserves	Crude oil and condensate which can be recovered from an underground reservoir using standard production techniques.
Direct current (dc)	An electric current that is continuous, steady and in one direction only.
Electric vehicle (EV)	Independent passenger or delivery vehicle that operates on electricity from a battery.
Electrode	A conductor made of a solid, reactive material, usually a metal or metallic oxide, that allows current to be passed into or out of an electrical system.

Electrolysis	Chemical decomposition of an electrolyte caused by the passage of an electric current. Used, for example, to break water into its component gases, hydrogen and oxygen.
Electrolyte	Nonmetallic electric conductor in which current is carried by the movement of positive and negative ions.
Energy density	Energy storage capacity per unit weight or volume.
Flywheel	Heavy wheel used to absorb and store energy by means of momentum. Smoothes out fluctuations in power input.
Fuel cell	An electrochemical cell in which energy is produced directly by oxidation of a fuel such as hydrogen.
Golf cart battery	Type of storage battery commonly used to power certain types of electric vehicles, such as golf carts and forklift trucks. It has a life of 200 to 400 operating cycles.
Grid	A network of conductors for distributing electric power.
Heavy rapid transit (HRT)	Generic term for public transit systems with high capacity (up to 25 000 to 40 000 passengers per hour per direction). Some HRT vehicles (such as subway cars) run on exclusive rights-of-way; others (such as commuter rail vehicles) operate on a right-of-way shared with other rail vehicles.
Hybrid vehicle	Type of electric vehicle in which a gasoline engine and an electric motor drive the vehicle through a common driveshaft. The gasoline is used to supplement battery capacity and to improve range and performance.
Hydrocarbon	One of a very large series of chemical compounds, consisting solely of carbon and hydrogen atoms, which form the basis of all petroleum products. Those with few carbon atoms are gases and those with many are solids.
Hydrogen	The simplest and lightest element. In its molecular form it is a colourless, odourless, tasteless gas, but it never occurs naturally in this form.
Illuminant	Hydrocarbon that burns with a luminous flame; used as an additive in some fuels to make them visible when burning.
Inflammable	Outdated synonym for 'flammable', i.e., supports combustion.
Ion	An atom which has acquired a positive or negative charge by respectively losing or gaining electrons.
Lead-acid storage battery	Type of secondary or storage battery with a positive plate made of lead dioxide and a negative plate of pure lead immersed in an electrolyte of sulphuric acid and water. Conventional automobile battery; can be recharged.
Lead dioxide	Lead compound ($PbSO_3$) used as an electrode in lead-acid storage batteries.

Lead sulphate	Lead compound (Pb_3SO_4) formed by the reaction of lead and sulphuric acid in a lead-acid storage battery.
Light rapid transit (LRT)	Generic term for public transit spanning the range between buses and streetcars and conventional rail systems; maximum capacity is in the order of 8000 passengers per hour per direction. LRT systems operate on either a shared or exclusive right-of-way.
Linear induction motor	Electromagnetic device resembling a conventional rotary motor which has been 'unrolled' and the rotor fixed to the track.
Liquefied petroleum gas	A group of hydrocarbon gases, primarily butane and propane, obtained from crude oil and natural gas production and also as byproducts of refining. Compressed to liquid form for storage and transportation and used as a fuel.
Liquid scrubber	Equipment for removing impurities from a gas by passing it over rotating surfaces or brushes partially immersed in liquid.
LPG	*See* Liquefied petroleum gas.
Maglev	Magnetically levitated, i.e., lifted and propelled by magnetic force induced by electricity.
Metal hydride	Chemical combination of a metal with hydrogen. Provides hydrogen storage at relatively low pressures.
Methane	Colourless, odourless, flammable gas with the formula CH_4, making it the simplest hydrocarbon. Main constituent of natural gas.
Microcar	A one- to three-passenger vehicle suitable for urban use. Electric microcars can achieve speeds in the order of 60 km/h and have a range of 40 km to 80 km between charges.
Natural gas	Flammable mixture of gaseous hydrocarbons, mainly methane. Occurs naturally, usually in association with crude oil.
Negative plate	*See* Cathode.
Nickel-iron battery	Newer, more advanced type of storage battery with nickel and iron electrodes and a potassium hydroxide electrolyte.
Nickel-zinc battery	Newer, more advanced type of storage battery with nickel and zinc electrodes and a potassium hydroxide electrolyte.
Nuclear fission	Splitting of the nucleus of a heavy, unstable atom into two parts, usually with the emission of radiation, heat and neutrons.
Operating cycle	The number of times a battery can be 80 per cent discharged.
Piston	Engine component that moves back and forth in the cylinder under the force of the exploding fuel.
Piston engine	A type of engine characterized by reciprocating motion of pistons in a cylinder. Most automobile engines are of this type.

Polymer	Substance formed by the joining of two or more identical simple molecules (monomers) into giant molecules. Polyethylene, for example, is a polymer of ethylene.
Positive plate	See Anode.
Power density	The amount of power available from a battery at a given time per unit volume.
Propane	Heavy, volatile, colourless hydrocarbon gas (C_3H_8) that can be readily liquefied at ambient temperatures and is the main component of LPG. Can be extracted from natural gas and is also produced during refining.
Refining	Process of heating crude oil until it separates into its chemical components, which are then processed into usable products.
Regenerative braking	Storage of energy generated by braking of a vehicle for use in acceleration.
Shift reactor	Processing device used to shift the ratio of carbon monoxide in synthesis gas obtained from coal closer to the optimum for methanol production.
Sodium sulphur battery	Advanced battery system with liquid sodium and sulphur electrodes and a solid glass or ceramic electrolyte.
Starting, lighting and ignition (SLI) battery	Type of storage battery used for starting a conventional vehicle engine and powering the vehicle's lighting system.
Steam reforming	Production of synthesis gas by passing methane or other hydrocarbon vapour over a catalyst at high temperature.
Storage capacity	Quantity of energy from a chemical reaction that can be stored for later release when the reverse reaction occurs.
Synthesis gas	Mixture of carbon monoxide and hydrogen used as a feedstock for manufacturing fuels such as methanol or hydrogen.
Synthetic crude oil	Oil produced by upgrading heavy oil and bitumen.
Synthetic fuels	Liquid or gaseous fuels, similar to those made from light crude oil, produced from bitumen, heavy oil, natural gas, coal or biomass.
Town gas	Fuel gas with a high hydrogen content manufactured from coal.
Trolley	Type of rubber-tired vehicle electrically powered from overhead wires.
Turbine engine	Type of engine that converts the kinetic energy in a moving fluid into mechanical energy by the rotation of fan-like blades.
Volatile	Readily evaporates at relatively low temperatures.

Watt	Unit of power, equal to the production of energy at the rate of 1 joule per second. When referring to electrical power, equals amps multiplied by volts.
Watt hour per kilogram	Amount of energy produced over a given period of time per unit weight (see Energy density).

Disponible en français sur le titre
LES CARBURANTS DE L'AVENIR
VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET VÉHICULES À L'HYDROGÈNE

LES CARBURANTS DE L'AVENIR

VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET VÉHICULES À L'HYDROGÈNE

Canada

LES CARBURANTS DE L'AVENIR

VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET VÉHICULES À L'HYDROGÈNE

TABLE DES MATIÈRES

Préface	3
LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES	5
Introduction	5
Historique du transport par véhicules électriques	7
Le transport en commun par véhicules électriques aujourd'hui	9
Les véhicules électriques	15
L'HYDROGÈNE DANS LES TRANSPORTS	23
Introduction	23
Historique de l'utilisation de l'hydrogène dans les transports	24
L'hydrogène dans l'industrie	26
L'hydrogène — une devise énergétique	28
Stockage et distribution de l'hydrogène	33
Glossaire	36

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1986
No. de cat. M27-74/2-1986F
ISBN 0-662-93845-3

VÉHICULES ÉLECTRIQUES ET VÉHICULES À L'HYDROGÈNE

PRÉFACE

Au cours des années à venir, l'industrie canadienne des transports connaîtra des changements causés par la diminution de nos réserves de pétrole classique. Ces changements seront graduels et la grande majorité de nos véhicules continueront à utiliser pour de nombreuses années encore les carburants tirés du pétrole. À l'aube du XXI[e] siècle toutefois, les formes d'énergie ne provenant pas du pétrole prendront une importance accrue dans les transports.

La présente publication porte sur deux de ces formes d'énergie: l'électricité et l'hydrogène. L'électricité n'est pas une nouvelle venue dans le monde des transports: certains véhicules — voitures de métro, tramways — fonctionnent grâce à l'électricité, sans parler des batteries électriques qui fournissent l'énergie nécessaire au démarrage des moteurs. Par contre, peu d'entre nous sont conscients de l'importance de l'hydrogène dans nos vies quotidiennes. Pourtant, l'hydrogène joue un rôle capital dans l'industrie et dans le raffinage du pétrole. Il rend possible également le lancement des fusées.

Plusieurs raisons expliquent l'attrait que représentent l'électricité et l'hydrogène comme « carburants » pour les véhicules: ils peuvent être produits à partir d'une gamme variée de sources d'énergie, renouvelables et non renouvelables, et leur utilisation dégage beaucoup moins de substances polluantes que les carburants classiques. Dans de nombreux centres urbains, les véhicules électriques de transport en commun sont chose courante. Cependant, l'utilisation de l'électricité ou de l'hydrogène dans les véhicules particuliers présente certains problèmes. Au Canada comme à l'étranger, les chercheurs tentent de régler ces problèmes. On ne doit toutefois pas se bercer d'illusions : il faudra probablement attendre des années avant que les véhicules électriques particuliers sillonnent les rues en grand nombre et encore plus longtemps avant que l'hydrogène ne devienne un combustible répandu.

La présente publication est divisée en deux sections. La première porte sur l'électricité, une forme d'énergie bien connue de tous, et la seconde traite de l'hydrogène, un « carburant » de l'avenir fort prometteur.

LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

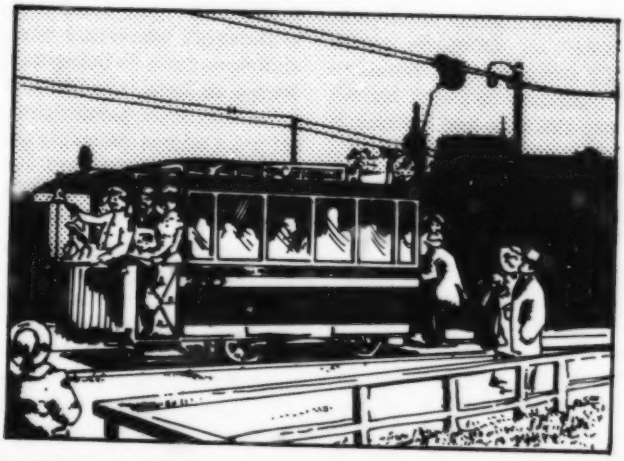
INTRODUCTION

Les véhicules électriques ont une histoire passionnante. Au début du siècle, l'automobile électrique était considérée comme le digne successeur du cheval, car elle semblait beaucoup plus utile que l'automobile à essence d'alors. En effet, l'électricité est une source d'énergie intéressante à maints égards, car elle est fiable, elle est peu polluante et elle assure un fonctionnement efficace.

Dans les pages qui suivent, nous présenterons deux types de véhicules électriques fort différents. En premier lieu, nous traiterons des véhicules de transport en commun: les tramways, les trolleybus, les trains, ainsi que les métros légers. Ces véhicules suivent un câble ou un rail qui, installé en permanence, les alimente en électricité. En second lieu, nous parlerons des véhicules particuliers autonomes dans lesquels l'électricité est fournie sur demande par une batterie. Chaque type de véhicule répond à des besoins de transport distincts.

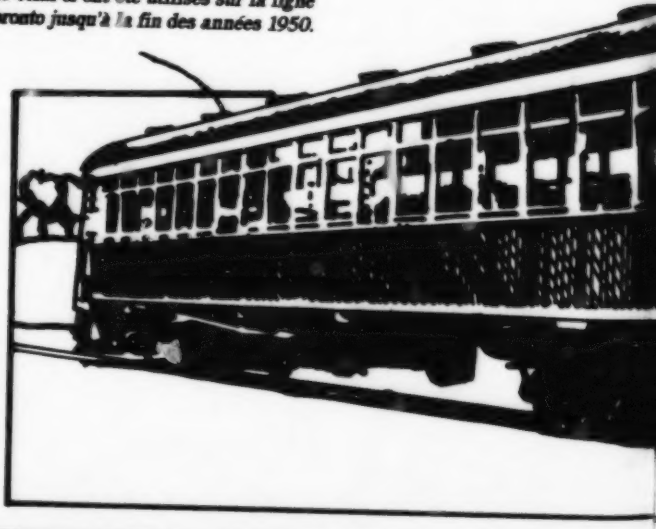
Les véhicules de transport en commun à propulsion électrique sont presque exclusivement utilisés dans les centres urbains. On note toutefois un regain d'intérêt au Canada dans le transport interurbain par chemin de fer électrique, mode de transport fort répandu en Europe, au Japon et en URSS. Quant aux véhicules électriques particuliers, ils pourraient offrir les mêmes avantages que les véhicules à essence ou au carburant diesel. Leur utilisation généralisée est cependant limitée en raison du poids considérable et de la faible puissance des batteries actuelles. Jusqu'à présent, les véhicules électriques ont surtout servi pour des travaux spécialisés; c'est notamment le cas des chariots élévateurs et des véhicules à faible autonomie. Mais déjà dans certains pays, en Angleterre par exemple, les véhicules électriques utilitaires (fourgonnettes de livraison) sont de plus en plus utilisés.

Ces deux types de véhicules font l'objet de travaux soutenus de recherche et de développement. Compte tenu de l'augmentation du prix des carburants liquides classiques, ces véhicules prendront une importance accrue. Dans les chapitres suivants, nous examinerons les utilisations actuelles et futures de l'électricité dans les transports.



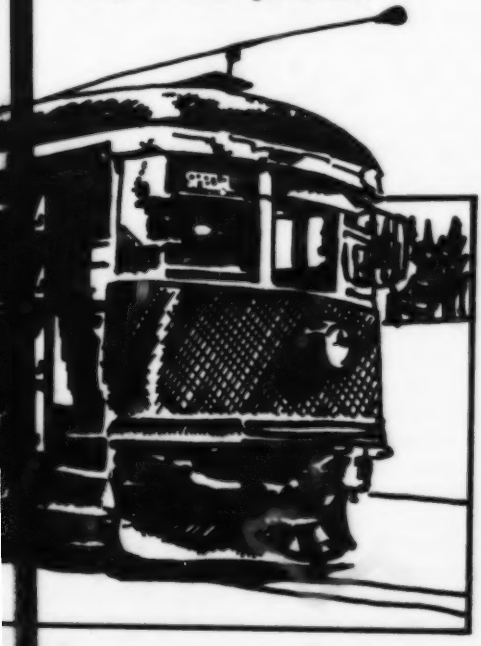
L'un des premiers tramways au Canada.

Des wagons électriques comme celui-ci ont été utilisés sur la ligne Niagara – St. Catharines – Toronto jusqu'à la fin des années 1950.



HISTORIQUE DU TRANSPORT PAR VÉHICULES ÉLECTRIQUES

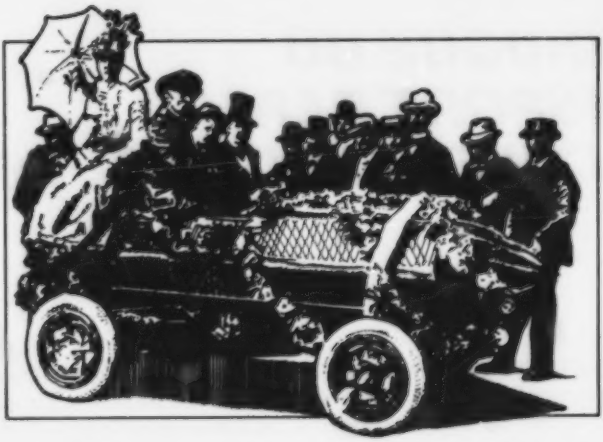
Faire l'historique du transport par véhicules électriques revient en définitive à faire celui des véhicules électriques de transport en commun, car l'utilisation des véhicules électriques particuliers est jusqu'à présent demeurée marginale. Jusqu'à récemment en effet, ces derniers pouvaient seulement fonctionner à l'aide de batteries lourdes et encombrantes, alors que les véhicules publics ont pu dès le début s'alimenter aux lignes électriques et tirer profit des réseaux électriques existants. À mesure que l'électrification progressait à la fin du XIX^{e} siècle, les véhicules électriques de transport en commun se firent plus nombreux dans les villes d'Europe et d'Amérique du Nord.



Les premiers véhicules électriques furent les tramways, à peine plus grands alors que les traditionnelles voitures à cheval, auxquelles elles ressemblaient fort d'ailleurs. Plus tard, des tramways de plus grandes dimensions composés de plusieurs unités reliées entre elles furent mis en service. En 1890, le transport urbain franchissait une étape importante avec l'ouverture du premier chemin de fer électrique souterrain, le fameux « Underground », à Londres (Angleterre). Au Canada, le premier métro fut construit à Toronto au début des années 1950, et la construction du métro de Montréal suivit au milieu des années 1960.

Le premier train électrique canadien pour passagers avait toutefois été fabriqué bien auparavant, en 1884, et il avait alors été présenté à la Foire agricole de Toronto. Dans les années 1920, près d'une cinquantaine de villes canadiennes possédaient des services de tramway, mais l'enthousiasme pour ce mode de transport commença à vaciller lorsque les automobiles et les autobus diesel envahirent les routes. En 1965, Toronto était la seule ville canadienne qui avait conservé un réseau de tramway. Ce fut une sage décision, car la ville de Toronto n'eut pas à subir les contrecoups de la hausse vertigineuse des prix du carburant diesel au cours des années 1970, ayant préféré garder ses tramways au lieu de les remplacer par des autobus diesel.

Au début du siècle, les trolleybus, véhicules semblables aux tramways mais ne roulant pas sur des rails, firent leur apparition en Allemagne. Ces véhicules gagnèrent en popularité et, au début de la Seconde Guerre mondiale, un certain nombre de villes canadiennes possédaient un réseau de trolleybus. À la fin de



La Jamais Contente, *première automobile à dépasser le cap des 100 km/h.*

la guerre, les populations urbaines se déplacèrent vers les banlieues et l'augmentation graduelle du prix de l'électricité fit du trolleybus un véhicule peu économique. Toutefois, les villes de Vancouver, Edmonton et Toronto exploitent encore plusieurs centaines de trolleybus.

Des chemins de fer électriques ont également été construits dans de nombreuses régions du Canada. Ces voies de transport ont donné naissance à la navette quotidienne des banlieusards et elles ont également donné pour la première fois aux populations rurales un accès aisé à la ville. Mais de nouveau, la popularité croissante de l'automobile et l'expansion du réseau routier après la Seconde Guerre mondiale mirent fin à la construction de ces lignes interurbaines. En 1959, les opérations cessaient sur la dernière ligne électrique interurbaine encore en service, soit celle reliant Niagara, St. Catharines et Toronto.

Au début du XX^{e} siècle, on se désintéressa des véhicules électriques particuliers. Ces véhicules avaient pourtant connu des jours de gloire au cours des années 1880 et 1890, alors qu'il s'en fabriqua des modèles expérimentaux en Angleterre, en France et aux États-Unis. En Angleterre, les progrès dans ce domaine furent cependant entravés par le *Locomotive Act* qui limitait la vitesse des véhicules à 6 km/h et qui stipulait que les véhicules devaient être précédés d'un homme à pied portant un drapeau rouge, mais les autres pays ne furent pas aussi restrictifs en la matière. En 1899, la *Jamais Contente*, un véhicule électrique original construit en Belgique et doté d'une carrosserie en aluminium, devint la première automobile à franchir le cap des 100 km/h. Au début des années 1900, un tiers de tous les véhicules roulant aux États-Unis étaient propulsés par l'électricité.

Au cours des deux premières décennies du XX^{e} siècle, on vit apparaître dans les rues une gamme variée de véhicules électriques commerciaux — des camions de livraison aux pompes à incendie. Le fonctionnement de ces véhicules était beaucoup plus aisé et plus silencieux que celui, souvent imprévisible, des véhicules à essence. Mais la popularité des véhicules électriques ne dura pas. L'invention du démarreur, jumelée aux progrès du raffinage du pétrole, fit pencher la balance en faveur des moteurs à combustion interne. Les véhicules électriques étaient jugés plus perfectionnés, mais leur coût de fabrication et d'utilisation était élevé et leur autonomie limitée à 25 km, après quoi il fallait recharger les batteries. Lorsque les automobiles commencèrent à être fabriquées en série, l'essence, un combustible à haute densité énergétique, s'était déjà imposée comme carburant universel.

LE TRANSPORT EN COMMUN PAR VÉHICULES ÉLECTRIQUES AUJOURD'HUI

Le transport en commun utilise actuellement environ 5 % de tout le carburant diesel consommé au Canada. Si l'on pouvait trouver une source d'énergie de remplacement pour le transport en commun, non seulement économiserait-on nos réserves de carburants pétroliers, mais cela constituerait sans aucun doute un bon exemple pour le reste du secteur des transports.

Il y a deux façons de transporter un grand nombre de personnes. D'une part, les autobus et les autres véhicules peuvent emprunter les réseaux routiers urbains, mais ils doivent alors partager la route avec les autres utilisateurs, ce qui peut représenter un inconvénient sérieux dans le centre des villes. D'autre part, on peut faire rouler les véhicules sur des voies partiellement ou totalement séparées du réseau routier. Ce dernier mode de transport se prête particulièrement bien à la propulsion électrique, seule ou jumelée à d'autres formes d'énergie.

Les avantages de l'électricité pour le transport en commun sont identiques à ce qu'ils étaient il y a plusieurs décennies. L'avantage principal est le couple élevé et instantané (le couple est la force de rotation) livré par un moteur électrique, ce qui signifie que le moteur fournit sur-le-champ une puissance motrice maximale. Grâce à ce couple élevé, les véhicules électriques sont en mesure d'accélérer rapidement, caractéristique idéale pour les véhicules qui doivent faire des départs et des arrêts fréquents. De plus, le rendement énergétique des moteurs électriques est de 90 à 95 %, alors que les moteurs à combustion ont un rendement énergétique de seulement 25 à 30 %.

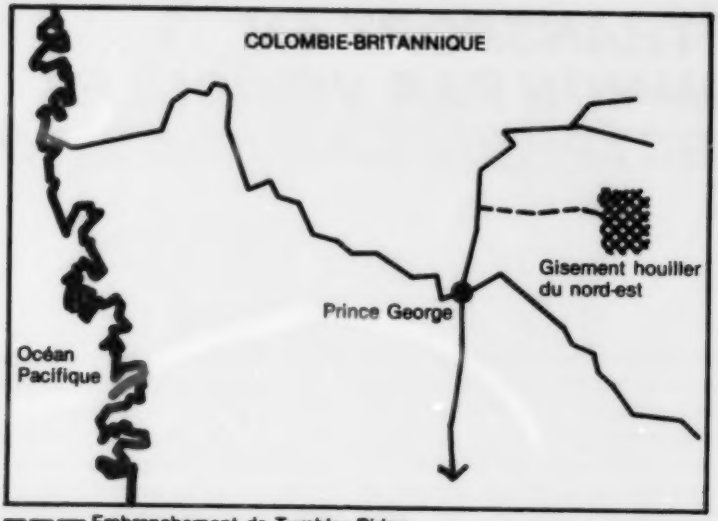
Un réseau de transport en commun est efficace uniquement s'il est en mesure d'assurer aux usagers un trajet direct, dans un temps et à un coût équivalents à ce que permet l'automobile. L'usager doit avoir facilement accès aux points desservis par le véhicule et compter sur un service régulier. Également, l'usager doit pouvoir atteindre sa destination directement et rapidement. Les réseaux composés uniquement d'autobus ont de plus en plus de difficulté à assurer ce type de service, en raison de l'encombrement accru des routes, ce qui rend difficile le respect des horaires.

Face à cette situation, on a assisté en Amérique du Nord à la mise en service de lignes d'autobus dites de distribution locale, qui sont jumelées à des véhicules électriques rapides afin d'assurer la desserte efficace des centre-ville. Ce mode de transport est déjà implanté dans bon nombre de pays européens, où l'abandon du transport par véhicules électriques n'a pas été aussi massif qu'en Amérique du Nord. Un tel système de transport démontre bien que l'électricité ne concurrence pas toujours les carburants pétroliers et que, en fait, elle peut être une forme d'énergie complémentaire.

Fonctionnement des véhicules publics électriques

Tout véhicule public à propulsion électrique possède quatre parties essentielles: un système de propulsion, un système de régulation du courant, un collecteur de courant (ces trois organes équipent le véhicule), ainsi qu'un réseau de distribution de l'électricité.

- Le *système de propulsion* comprend tous les organes nécessaires au déplacement du véhicule, tels les moteurs et les



L'embranchement de Tumbler Ridge. Le premier chemin de fer électrique moderne au Canada desservira la région houillère du centre de la Colombie-Britannique et rejoindra la ligne principale de B.C. Railway à Anzac.

engrenages. Un moteur électrique est tout bonnement un dispositif qui transforme l'électricité en énergie mécanique. Il existe différents types de moteurs électriques, mais les véhicules électriques sont équipés du moteur à courant continu.

- Le *système de régulation du courant* comprend les divers organes, tels les transformateurs, qui commandent la puissance et le régime du moteur.
- Le *collecteur de courant* est le dispositif qui relie le véhicule au réseau de distribution électrique. L'électricité peut être transmise par câble aérien (le collecteur s'appelle alors pantographe) ou, dans le cas des métros, par un « troisième rail » posé sur la voie, entre les rails ou à l'extérieur de ceux-ci.
- Le *réseau de distribution de l'électricité* est, comme son nom l'indique, un ensemble de câbles ou de rails qui assurent la distribution de l'électricité à tous les véhicules.

L'électricité est acheminée d'un poste principal de la société d'électricité jusqu'à une sous-station où elle est habituellement redressée en courant direct pour ensuite être dirigée jusqu'au réseau de distribution. De là, le courant passe par le collecteur jusque dans le système de propulsion. (Dans le cas d'un « troisième rail », le courant est fourni à un rail électrifié parallèle à la voie, et le collecteur recueille l'électricité parcourant ce rail). Enfin, le moteur transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, laquelle fait avancer le véhicule.

Chemins de fer électriques

Les chemins de fer électriques sont depuis longtemps en service en Europe, au Japon et en URSS. Au Canada, on note un intérêt grandissant dans l'électrification des chemins de fer. Bien que les investissements requis soient énormes, l'électrification des chemins de fer assurerait l'indépendance de ce mode de transport face aux carburants pétroliers. Un projet pilote de voie ferrée électrique moderne

est actuellement en cours en Colombie-Britannique, avec l'appui des gouvernements fédéral et provincial. En effet, B.C. Railway a construit et électrifié l'embranchement de Tumbler Ridge qui relie les mines de charbon du nord-est de la province à un nouveau terminal en eau profonde, près de Prince-Rupert, d'où le charbon sera exporté vers le Japon. Construit au coût de 400 millions de dollars et d'une longueur de 130 km, l'embranchement traverse les régions montagneuses et inhabitées.

L'expérience acquise avec l'embranchement de Tumbler Ridge pourrait encourager l'électrification d'une bonne partie du réseau ferroviaire canadien. Déjà, on a étudié la possibilité de construire une ligne haute vitesse à alimentation par câble aérien, dans le corridor Toronto–Ottawa–Montréal.

Transport urbain rapide

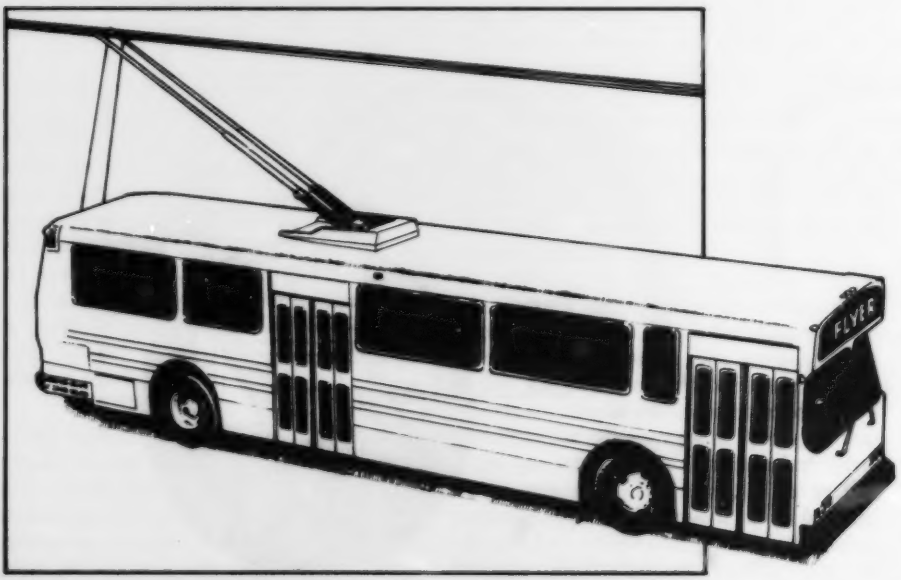
Le secteur du transport urbain par véhicules électriques rapides connaît actuellement un essor important. Ce type de transport est divisé en trois grandes catégories : métros légers ordinaires, métros légers automatisés et réseaux sur rail lourd.

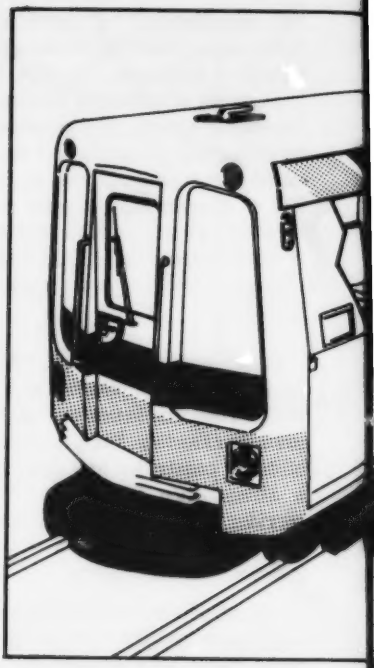
Dans un métro léger, les véhicules, habituellement alimentés par pantographe, roulent sur des voies partagées ou exclusives. Les rails complètent le circuit.

Le plus ancien type de véhicule léger propulsé par l'électricité est le trolleybus. Même si ce véhicule est moins populaire qu'avant, les nouveaux systèmes légers offrent un rendement énergétique supérieur et l'on note un regain d'intérêt partout dans le monde pour ce mode de transport.

Plusieurs villes canadiennes se sont dotées de réseaux rapides légers. Au cours des années 1970, Calgary et Edmonton ont mis en service des réseaux conçus en Europe. La ville de Toronto a rajeuni certaines lignes de son réseau de tramways en mettant en service un nouveau tramway conçu par la Société de développement du transport urbain (SDTU).

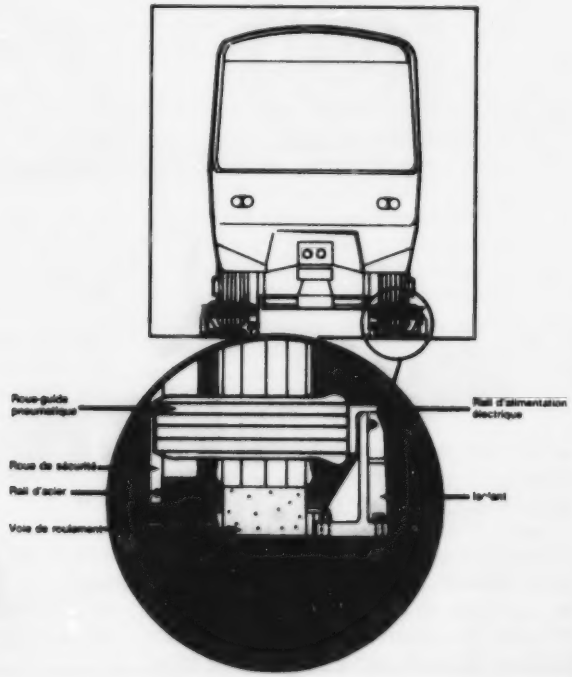
Un trolleybus moderne sur pneus de caoutchouc. Le mot « trolley » vient de l'anglais « troller » qui désignait l'un des premiers dispositifs collecteurs de courant.





Véhicule construit par la SDTU et utilisé dans le nouveau métro léger automatisé de B.C. Transit.

Voiture et voie typiques utilisées dans le métro de Montréal.



Cette société canadienne est un chef de fil mondial dans la technologie du transport urbain sur rail léger et elle fabrique des véhicules de conception innovatrice destinés aux métros légers automatisés.

Les voitures fabriquées par la SDTU sont très légères. Le châssis et la carrosserie sont faits d'aluminium soudé et les extrémités sont en fibre de verre. Présentant un faible volume (de la taille d'un autobus ordinaire), les voitures peuvent être utilisées seules ou être regroupées en rames. Quant à la voie, étroite et peu encombrante, elle peut suivre un parcours surélevé, au niveau du sol ou souterrain. De plus, elle procure aux voitures un roulement régulier et silencieux, en particulier dans les courbes.

C'est également la SDTU qui a fabriqué les voitures sur rail léger pour le premier métro léger entièrement automatisé au Canada, exploité par B.C. Transit et intégré au réseau régional de transport rapide de Vancouver. Ce métro est relié aux principales lignes d'autobus diesel et de trolleybus et dessert un terminal de traversiers, dans le secteur des quais.

Le transport sur rail lourd revêt la forme des métros ou des trains qui assurent la liaison avec les banlieues. Ces réseaux fonctionnent à l'instar des services ferroviaires, un certain nombre de voitures étant regroupées ensemble pour former une rame. Les métros de Montréal et de Toronto offrent des exemples de transport sur rail lourd.

Le transport public par véhicules électriques suscite un vif intérêt en Europe, en Amérique du Nord, en Asie et en Australie. Les Américains voient d'ailleurs dans le rail léger un moyen de rajeunir leurs réseaux de transport urbain vétustes. De plus, les entreprises aérospatiales, qui possèdent la technologie requise pour fabriquer ces véhicules, y voient également de nouveaux marchés. Autre avantage des réseaux sur rail léger: ils peuvent être prolongés au besoin, selon le rythme de l'expansion urbaine, sans qu'il en coûte des sommes excessives.

L'avenir du transport en commun par véhicules électriques

Les réserves de pétrole sont limitées. C'est un fait. C'est pourquoi les chercheurs tentent d'améliorer l'efficacité et la rentabilité des véhicules électriques. Certains envisagent de combiner l'électricité à d'autres formes d'énergie motrice (par exemple, on pourrait munir les trolleybus d'un accumulateur auxiliaire, d'une pile à combustible, d'un moteur diesel ou d'un volant d'inertie), alors que d'autres axent leurs travaux sur la mise au point de moteurs électriques plus efficaces.

Un certain nombre de projets actuellement en cours portent sur l'essai des volants d'inertie dans des tramways, des autobus et des trains. Le principe de fonctionnement des volants est simple: un disque en rotation peut emmagasiner efficacement de l'énergie à condition que les forces de friction soient réduites au minimum. Par exemple, les volants peuvent être utilisés pour le « freinage rétroactif », c'est-à-dire qu'ils récupèrent l'énergie habituellement perdue lors du

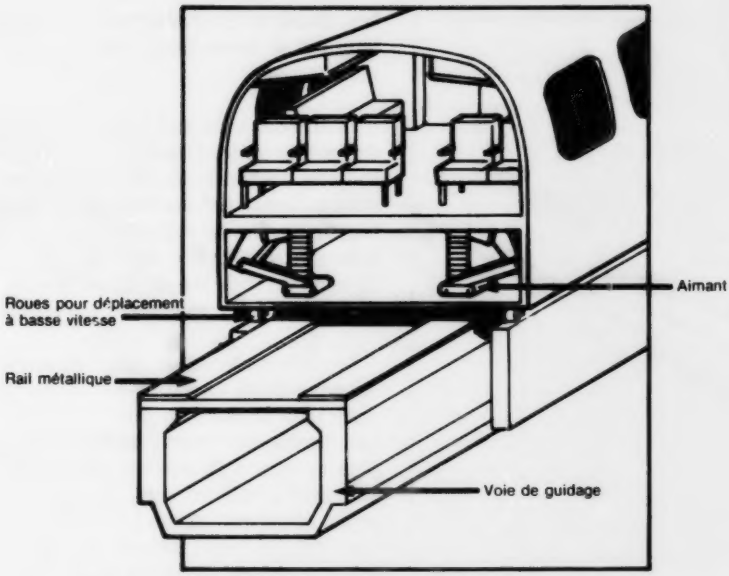


Schéma conceptuel du train à « propulsion magnétique ». Le train est propulsé par un moteur à induction linéaire. À mesure que le train prend de la vitesse, les aimants placés sous les wagons jouent le rôle de l'induit mobile d'un générateur électrique, ce qui génère un courant électrique dans les rails métalliques. Ce courant génère à son tour un champ magnétique qui repousse les aimants du train. De cette façon, le train peut être soulevé jusqu'à 20 cm au-dessus du sol. Si le train se déporte légèrement vers un côté, comme c'est le cas dans une courbe, les forces magnétiques répulsives deviennent plus fortes sur ce côté de la voie, ce qui a pour effet de ramener le train dans la bonne assiette.

freinage et ils l'emmagasinent jusqu'à ce que le véhicule accélère de nouveau; ils la cèdent alors au véhicule afin de faciliter l'accélération.

Dans un proche avenir, nous assisterons à des changements rapides dans le transport par rail. Déjà, les premiers trains à électro-aimant sont en service en Grande-Bretagne. Ces véhicules fonctionnent selon une idée proposée avant la Première Guerre mondiale: à l'aide d'un fort champ électromagnétique, un wagon peut être soulevé légèrement au-dessus de la voie ferrée et être déplacé vers l'avant. Comme il n'y a pas de contact entre la roue et la rail, il n'y a pas de frottements. Ainsi, on réduit les dommages au rail, ce qui est un sérieux problème avec les autres types de véhicules haute vitesse sur rail (même avec les véhicules légers).

LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

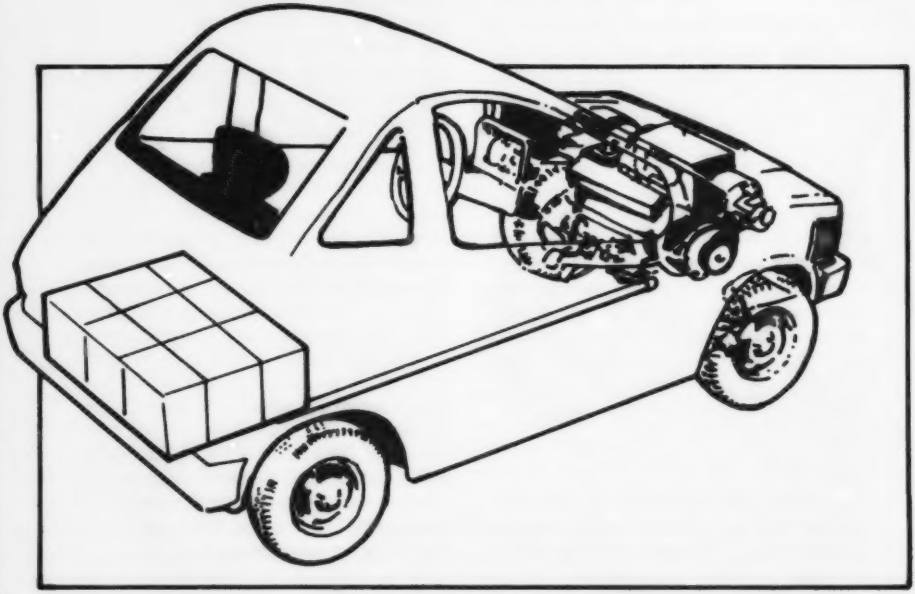
Fonctionnement d'un véhicule électrique

Un véhicule électrique sur roues possède un système de propulsion composé d'une batterie et d'un régulateur. L'électricité est fournie par une réaction chimique qui se produit dans la batterie. Celle-ci emmagasine l'énergie sous forme chimique, et non sous forme électrique. Cette énergie chimique peut par la suite être transformée en énergie électrique au besoin. Quant au régulateur, c'est un dispositif qui commande la quantité de courant fournie par la batterie, ce qui permet au conducteur de varier la vitesse de son véhicule.

Certaines automobiles ordinaires ont été converties à l'électricité. À cette fin, on a remplacé le moteur à combustion interne et le système d'alimentation en carburant par une série de batteries d'automobile logées dans le compartiment moteur et dans le coffre. Toutefois, le poids supplémentaire et la faible densité énergétique de ces batteries au plomb limitent l'autonomie du véhicule: 50 à 60 km tout au plus.

Un véhicule électrique comporte de 8 à 16 batteries, lesquelles sont habituellement logées

Petite automobile électrique convenant aux utilisations urbaines. Les batteries sont placées à l'arrière du véhicule.



dans le véhicule ou sous celui-ci. Le poids de ces batteries est un facteur important dont il faut tenir compte lors de la conception du véhicule. Les batteries peuvent en effet représenter de 35 à 40 % du poids du véhicule et fournir seulement un rayon d'action de 60 km, alors qu'un moteur à combustion interne et son système d'alimentation en carburant représentent seulement 25 % environ du poids du véhicule et qu'un réservoir plein donne habituellement une autonomie d'au moins 300 km.

Les batteries sont classées selon plusieurs caractéristiques. Il y a d'abord la *capacité de la batterie*, qui s'exprime en ampères-heures (A.h) et qui indique la quantité de courant que la batterie peut fournir dans un temps donné. Par exemple, une batterie de 80 A.h peut fournir 20 A pendant 4 h, ou 10 A pendant 8 h. La capacité d'une batterie diminue par temps froid: à −18 °C, la capacité d'une batterie au plomb est seulement 40 % de ce qu'elle est à température normale.

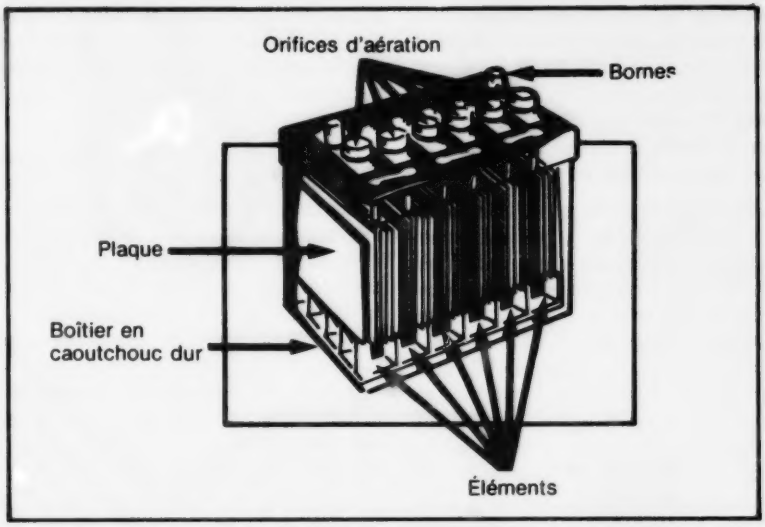
La *densité de puissance*, exprimée en watts par kilogramme de batterie, indique la puissance disponible à un moment donné dans des conditions optimales. C'est cette valeur qui détermine la vitesse maximale d'un véhicule ainsi que son accélération. La puissance totale que peut fournir une batterie au plomb dépend de la vitesse à laquelle elle se décharge. Si la batterie se décharge en une heure, elle fournira 100 % de sa puissance. Si le véhicule se déplace rapidement et si l'accumulateur se décharge en seulement 20 min, la batterie ne fournira que 40 % de sa puissance.

La quantité d'énergie utilisable que peut fournir une batterie au cours d'une période donnée par rapport à son propre poids est appelée *densité énergétique*. Cette quantité

FONCTIONNEMENT D'UNE BATTERIE AU PLOMB

Les batteries au plomb utilisées dans les automobiles modernes sont similaires aux batteries servant à propulser les véhicules électriques. Elles sont composées de plusieurs éléments identiques, chacun étant constitué de plaques positive et négative (les électrodes) immergées dans un liquide conducteur (l'électrolyte). La plaque positive est faite de bioxyde de plomb, et la plaque négative de plomb pur. Quant à l'électrolyte, c'est une solution d'eau et d'acide sulfurique. Les plaques sont isolées les unes des autres par des séparateurs faits d'un matériau non conducteur (par exemple, un plastique poreux). Les éléments sont contenus dans un boîtier de caoutchouc ou de plastique. Chaque élément chargé fournit une tension de 2 V. Une batterie de 12 V contient donc six éléments. Dans un véhicule électrique, on peut relier un certain nombre de batteries en série afin d'obtenir la tension totale désirée (habituellement 120 V).

La mise en marche du moteur déclenche une réaction chimique dans les éléments, ce qui provoque le déplacement de particules électriquement chargées à travers l'électrolyte. Le courant circule de l'électrode négative au moteur, et ensuite à l'électrode positive de l'élément. Il traverse l'électrolyte et retourne enfin à l'électrode négative, ce qui complète le circuit. Le passage du courant provoque une réaction chimique entre le plomb et l'acide, ce qui donne du sulfate de plomb et de l'eau. Cette réaction a deux effets. D'abord, l'eau dilue l'électrolyte. Ensuite, le sulfate de plomb forme progressivement une couche qui recouvre les deux plaques, ce qui empêche toute autre réaction. Dans une batterie rechargeable, on peut inverser le sens du courant. Cette inversion de courant provoque d'autres réactions chimiques qui renversent les deux effets mentionnés: le sulfate de plomb est décomposé et de nouvelles couches de bioxyde de plomb et de plomb pur sont déposées sur les plaques, réaction qui augmente la concentration d'acide sulfurique. L'énergie requise pour entretenir ces réactions est emmagasinée sous forme d'énergie chimique jusqu'à ce que l'élément soit déchargé une nouvelle fois et que l'énergie chimique soit de nouveau transformée en énergie électrique.



Dans les batteries au plomb couramment utilisées dans les automobiles, les six éléments sont montés en série afin de donner une tension de 12 V.

s'exprime en watts-heures par kilogramme (W.h/kg) de batterie. À l'heure actuelle, les batteries au plomb ont une densité énergétique d'environ 30 W.h/kg, ce qui est plutôt faible et limite le rayon d'action des véhicules électriques.

La *durée de vie* indique le nombre de fois qu'une batterie peut être déchargée à 80 % de sa capacité. (Il n'est pas recommandé de décharger une batterie à plus de 80 % de sa capacité, car cela réduit sensiblement sa durée de vie). Une batterie au plomb peut avoir une durée de vie de 400 cycles.

La batterie la plus populaire a toujours été la batterie au plomb, mise au point en France en 1859. Parmi les divers types de batteries au plomb qui existent, deux sont utilisés dans les véhicules: la batterie de démarrage (qui sert aussi à l'éclairage et à l'allumage), ainsi que la batterie de propulsion utilisée dans les voiturettes de golf. La batterie de démarrage est conçue pour fournir une puissance élevée pendant de brefs instants, à toutes les températures. Comme son nom l'indique, cette batterie est utilisée pour le démarrage des moteurs à combustion interne. Quant à la batterie de la voiturette de golf, elle peut donner une puissance élevée pendant un laps de temps plus long et sa durée de vie est de 200 à 400 cycles de fonctionnement. Utilisée depuis longtemps dans les voiturettes de golf et les chariots élévateurs, cette batterie est assez légère pour propulser les automobiles et les petits camions. Elle peut même propulser la dernière génération de véhicules électriques. La faible puissance fournie par cette batterie demeure toutefois un problème.

Les véhicules électriques (automobiles ou camions) auront un succès commercial seulement si l'on parvient à améliorer la capacité de stockage de l'énergie dans les batteries. Une batterie de propulsion doit procurer un rayon d'action suffisant au véhicule et fournir l'énergie supplémentaire requise lors des accélérations et des montées. À l'heure actuelle, les batteries au plomb sont très lourdes et sont incapables d'emmagasiner assez d'énergie pour permettre à un véhicule électrique de fonctionner aussi bien qu'un véhicule équipé d'un moteur à combustion. De plus, la plupart des batteries sont moins

efficaces lorsque la température baisse. Dans un climat comme le nôtre, il est donc essentiel de les réchauffer et de les isoler. Par ailleurs, il est manifeste que les véhicules électriques deviendront plus concurrentiels si l'on parvient à accroître la durée de vie des batteries, dont le coût de remplacement peut être élevé.

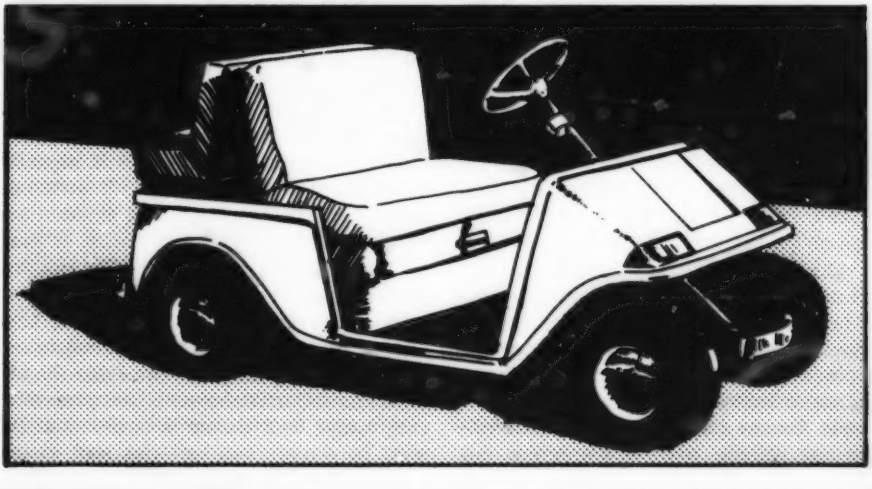
Au Canada comme ailleurs, les chercheurs tentent de perfectionner les batteries. Les nouvelles batteries seront légères, puissantes, de longue durée et, éventuellement, plus économiques que les batteries au plomb. Par exemple, la batterie nickel-zinc, initialement mise au point dans les années 1930, pèse la moitié moins qu'une batterie au plomb tout en fournissant une quantité égale d'énergie utilisable. Comme le poids des batteries limite l'autonomie des véhicules électriques, la batterie nickel-zinc permettrait donc de pallier ce problème. Cependant, la fabrication de ces batteries est coûteuse et leur durée de vie dans les véhicules est courte. Les chercheurs canadiens poursuivent leurs travaux afin d'améliorer les batteries et d'en réduire les coûts de fabrication.

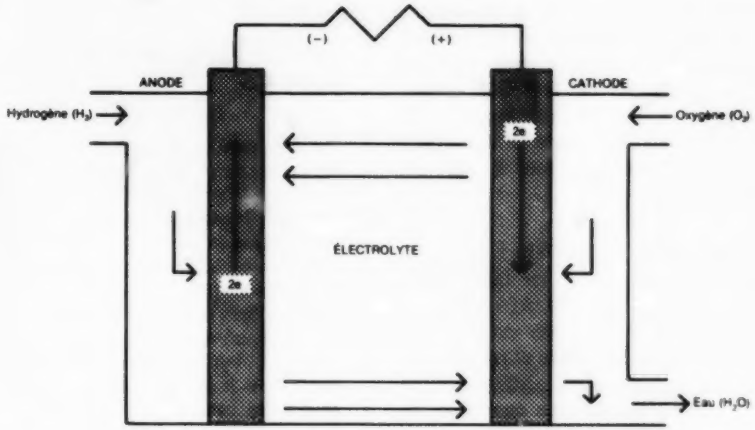
Autre solution possible: la batterie nickel-fer. Ce type de batterie procure une autonomie accrue au véhicule, mais il ne peut emmagasiner plus de 50 à 60 % de l'énergie contenue dans le courant de recharge, alors que la batterie au plomb emmagasine 75 % de cette énergie.

D'autres types de batteries seront éventuellement mis sur le marché, dont la batterie à haute température. Cette batterie donne aux véhicules une autonomie de plus de 300 km avec une même charge. La particularité de ces batteries réside dans le fait que les électrodes sont liquides. Pour maintenir les électrodes à l'état liquide, la température de fonctionnement doit être de l'ordre de 350 °C. L'électrolyte est un solide, habituellement de la céramique ou du verre. En théorie, ces batteries ont une densité énergétique élevée, mais les travaux de développement devront se poursuivre avant leur mise en marché. Elles ont toutefois subi avec succès des essais dans des véhicules prototypes, lesquels ont atteint des vitesses de plus de 100 km/h et ont parcouru plus de 150 km à l'aide d'une même charge.

De toutes les batteries à haute température qui font actuellement l'objet de travaux de développement, c'est la batterie sodium-soufre qui est la plus prometteuse. Elle peut emma-

Voiturette de golf électrique. Des véhicules similaires, équipées de batteries de voiturette de golf, sont employés comme véhicules à bagages et transporteurs de personnes dans les aéroports, et pour d'autres applications ne nécessitant pas une vitesse et une autonomie élevées.





Une pile à combustible hydrogène-oxygène. Une couche d'acide phosphorique est prise en étau entre deux électrodes: la cathode (charge négative) et l'anode (charge positive). Un gaz riche en hydrogène passe par-dessus l'électrode négative, alors que l'électrode positive est exposée à un gaz riche en oxygène. Le gaz d'hydrogène est séparé à l'une des électrodes en ions hydrogène (c'est-à-dire des atomes d'hydrogène possédant une charge positive) et en électrons, à l'aide d'un catalyseur, du platine par exemple. Les ions hydrogène traversent ensuite l'électrolyte en direction de l'oxygène. Les électrons circulent dans un circuit extérieur vers l'oxygène, où ils réagissent chimiquement avec les ions hydrogène et l'oxygène, ce qui donne de l'eau. Le passage des électrons dans le circuit extérieur crée un courant continu.

gasiner jusqu'à cinq fois plus d'énergie que la batterie au plomb, à poids égal, et elle peut être fabriquée à partir de matérieux abondants et bon marché, ce qui n'est pas à négliger. En outre, ces batteries forment des systèmes clos — nul besoin d'entretien. Cette batterie doit toutefois être conservée au chaud.

Piles à combustible

Une pile à combustible fonctionne selon les mêmes principes qu'une batterie, mais, au lieu d'être chargée électriquement, c'est un combustible qui lui fournit l'énergie chimique. Le combustible est oxydé par un catalyseur, une substance qui accélère une réaction chimique sans toutefois subir elle-même de modification chimique. L'énergie dégagée au cours de la réaction est utilisable directement sous forme de courant électrique. À la différence des batteries classiques, une pile à combustible continuera à fonctionner tant qu'il y a du combustible et un oxydant.

La pile à combustible la plus répandue fonctionne à l'hydrogène et à l'oxygène. Les « électrodes » sont des chambres creuses métalliques, l'une étant remplie d'hydrogène et l'autre d'oxygène. L'électrolyte est contenu dans un porte-électrolyte en céramique poreuse conçu de façon à empêcher le mélange des gaz tout en leur permettant d'entrer en contact avec l'électrolyte.

La réaction qui a lieu dans la pile à combustible peut être représentée comme suit :

$2H_2$	+	O_2	→	$2H_2O$	+ électricité
hydrogène		oxygène		eau	

Comme le seul produit de la réaction est l'eau, la pile à combustible est propre. L'utilisation de cette pile dans un véhicule pose un seul problème: celui de l'approvisionnement sûr et à bon marché en hydrogène, lequel devrait être liquéfié. Pour ce qui est de

l'oxygène, il peut être extrait facilement de l'air environnant. Il serait également possible d'utiliser des hydrocarbures comme le gaz naturel, le méthanol ou l'essence comme sources d'hydrogène. Autre avantage des piles à combustible: leur rendement de conversion énergétique peut être supérieur à celui des moteurs classiques.

Aujourd'hui, l'emploi généralisé des véhicules électriques est limité par l'état actuel de la technologie des batteries et par leur coût élevé. Comme le coût des pièces est comparable pour un véhicule électrique et un véhicule à combustion interne, le coût additionnel de la batterie et du système de chauffage de l'habitacle doit être compensé par une réduction des coûts d'exploitation et d'entretien. Les véhicules électriques pourront alors intéresser les consommateurs. Bien que la rentabilité des véhicules électriques présente encore un inconvénient, ces véhicules offrent néanmoins plusieurs avantages, en particulier leur fonctionnement silencieux et non polluant.

À l'heure actuelle, les véhicules électriques sont principalement utilisés dans les endroits où l'on recherche avant tout un fonctionnement silencieux et propre, mais où le rayon d'action est moins important. Les chariots élévateurs électriques sont employés depuis les années 1930. Dans ce type de véhicule, le poids de la batterie n'est pas un handicap, bien au contraire, car la batterie sert de contrepoids à la charge portée par le chariot. Dans les aéroports, les véhicules porte-bagages et les transporteurs de personnes sont également des versions plus récentes du véhicule électrique « classique », tout comme la voiturette de golf. Au Royaume-Uni, on utilise des fourgonnettes électriques pour livrer le lait.

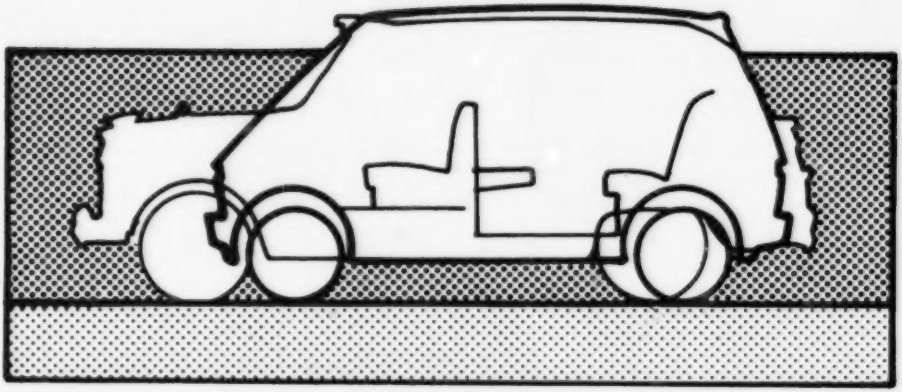
On ignore quelle forme prendra le véhicule électrique individuel: voiture de tourisme classique à quatre places, ou bien « micro-automobile » à trois places. Les taxis constituent un marché de choix pour la voiture électrique de dimensions courantes. Un taxi est avant tout un véhicule urbain qui parcourt un territoire limité et qui roule le plus souvent au ralenti, ce qui gaspille du carburant et pollue l'air.

LE TAXI ÉLECTRIQUE LUCAS

Au Royaume-Uni, les carburants pétroliers sont plus chers qu'au Canada et l'intérêt manifesté à l'égard des véhicules électriques y est vif. Lucas Chloride (société résultant de la fusion de Lucas et de Chloride, deux entreprises à la fine pointe des travaux sur les véhicules électriques en Grande-Bretagne) met au point et fabrique des pièces pour un nombre croissant de véhicules électriques. Le taxi électrique Lucas, en production depuis le milieu des années 1970, est doté d'une batterie au plomb issue d'une technologie moderne. Conçu en vue de son utilisation à Londres, le véhicule doit répondre à des exigences rigoureuses: grande manœuvrabilité et autonomie de 80 à 100 km par jour dans des rues très encombrées.

Le taxi de Lucas offre plusieurs caractéristiques propres au taxi londonien, y compris un compartiment à bagages à côté du conducteur ainsi qu'une cloison de verre percée d'un orifice de ventilation, entre le conducteur et les passagers. La carrosserie du taxi est en acier recouvert d'un plastique armé à la fibre de verre. Le véhicule pèse en tout 2 250 kg, dont 40 % en batteries uniquement. Le groupe électrogène est chargé par en dessous du véhicule et il est logé au niveau du châssis, ce qui procure un centre de gravité très bas au véhicule et facilite le remplacement des batteries.

Plusieurs sociétés en Europe et en Amérique du Nord ont axé leurs efforts sur la mise au point d'une « micro-voiture ». Celle-ci n'a pas encore atteint l'étape de la commercialisation et l'on ne prévoit pas qu'elle puisse concurrencer les sous-compactes à carburant avant les années 1990. En règle générale, la micro-voiture peut rouler à une vitesse maximale de 60 km/h et jouit d'une autonomie de 40 à 80 km entre chaque charge. Ce type de véhicule serait donc restreint à l'utilisation urbaine et servirait en particulier à la navette journalière des banlieusards. Les micro-voitures sont acceptées en Europe, mais, en



Taxi électrique fabriqué par Lucas, comparé à un taxi londonien typique. Le taxi Lucas est plus petit et plus manoeuvrable, ce qui ne l'empêche pas de conserver les caractéristiques du taxi londonien traditionnel.

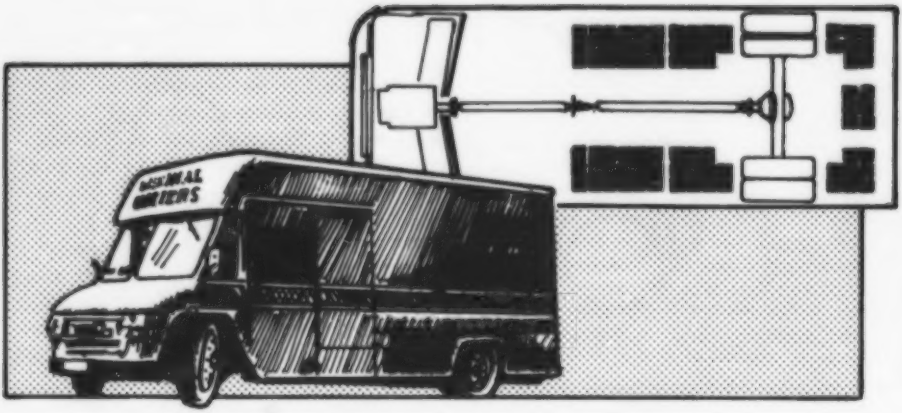
Amérique du Nord, il faudra modifier les règlements de certification et de sécurité des véhicules avant qu'elles ne soient autorisées à parcourir les routes.

Pour l'immédiat, c'est la fourgonnette de livraison qui représente le marché le plus intéressant pour la propulsion électrique. Les sociétés commerciales possèdent habituellement des services centralisés d'entretien pour leurs véhicules, lesquels parcourent souvent des territoires relativement restreints. L'autonomie et le rendement des véhicules électriques pourraient donc convenir aux besoins de ces entreprises. De plus, les véhicules de livraison ne cessent d'arrêter, démarrer et rouler au ralenti, ce qui consomme des quantités appréciables de carburant et représente une part importante des frais d'exploitation. Une entreprise qui possède un grand nombre de véhicules pourrait donc être intéressée à payer davantage à l'achat en contrepartie d'une réduction des frais d'exploitation et d'entretien.

Une variante intéressante du véhicule électrique est le véhicule hybride dans lequel un moteur à essence et un moteur électrique assurent la propulsion du véhicule à l'aide d'un arbre de transmission commun. Le moteur à essence joue le rôle d'organe propulseur auxiliaire: il fournit une puissance d'appoint, accroît l'autonomie du véhicule et chauffe l'habitacle. C'est la batterie qui fournit l'énergie habituellement requise pour la propulsion. Le moteur à essence procure le supplément d'énergie nécessaire notamment dans les montées. Mais d'après des essais réalisés sur des prototypes de véhicule hybride, le coût du moteur à essence et la complexité du système de commande annulent à toute fin pratique le gain d'autonomie.

L'avenir des véhicules électriques

À long terme, le succès commerciel des véhicules électriques dépendra d'un certain nombre de facteurs: le rôle des transports dans notre mode de vie futur, l'importance que prendront les questions environnementales (en particulier la pollution de l'air et le bruit), ainsi que la disponibilité et le coût des carburants classiques. À court terme, on ne doit pas s'attendre à ce que les véhicules électriques concurrencent sérieusement les véhicules à carburant. Par contre, ils continueront fort probablement à être utilisés pour des besoins spéciaux, lorsque leur coût élevé et leur faible autonomie sont compensés par des avantages précis.



La fourgonnette « Silent Karrier » fabriquée par Chloride n'a rien de particulier à première vue. Ce qui en fait un véhicule unique en son genre, c'est ce que l'on ne voit pas.

Les véhicules électriques feront une percée sur les marchés seulement lorsqu'on réussira à améliorer l'efficacité énergétique des batteries et à concevoir des stations de remplacement des batteries, ce qui poussera peut-être les entreprises à utiliser des véhicules électriques. Au Canada, les travaux de recherche et de développement dans le domaine des véhicules électriques sont orientés vers la mise au point et l'évaluation des batteries (y compris les batteries à haute densité énergétique) et des chargeurs de batteries. On cherche également à accroître la durée de vie des batteries.

LA FOURGONNETTE « SILENT KARRIER » DE CHLORIDE

La fourgonnette de livraison « Silent Karrier », fabriquée au Royaume-Uni par la société Chloride en 1977, est le premier véhicule construit dans le cadre du programme « Électrification de Londres ». Mis au point en collaboration avec Chrysler U.K. et la National Freight Corporation, le véhicule est muni d'un châssis et d'une carrosserie Dodge et il est équipé d'une batterie à haute densité énergétique spécialement conçue par Chloride. L'emploi du freinage rétroactif augmente l'efficacité énergétique du véhicule. Le bloc électrogène (batterie au plomb de 160 V) est placé sous le compartiment des marchandises. Le véhicule est également équipé d'une batterie auxiliaire de 12 V. Le conducteur est l'unique passager de la fourgonnette, laquelle offre une charge utile de plus de 1 500 kg, une vitesse maximale de 64 km/h et une autonomie de 64 km par charge.

L'HYDROGÈNE DANS LES TRANSPORTS

INTRODUCTION

L'hydrogène (dont la formule chimique est H_2) est le plus léger et le plus abondant des éléments. Gaz incolore, inodore et sans goût, l'hydrogène semble être le combustible idéal, car il brûle rapidement et proprement. L'hydrogène n'existe toutefois pas à l'état pur dans la nature; on le trouve toujours associé à d'autres éléments.

Tous les carburants que nous utilisons actuellement sont des mélanges d'hydrogène et de carbone — d'où le terme « hydrocarbure ». Il est cependant possible d'utiliser l'hydrogène pur pour faire fonctionner les moteurs, les turbines et les autres sources thermiques d'énergie mécanique. Par exemple, la navette spatiale américaine est propulsée dans l'espace par des fusées à hydrogène. On peut également utiliser l'hydrogène dans les piles à combustibles afin d'alimenter en électricité les véhicules électriques.

Comme l'hydrogène n'existe pas à l'état pur, on doit le produire à partir d'autres sources d'énergie. De nos jours, le mode de production le plus répandu consiste à extraire l'hydrogène du gaz naturel. Il est possible également de produire de l'hydrogène en faisant passer un courant électrique dans l'eau (H_2O), procédé connu sous le nom d'électrolyse. Avec l'électrolyse, l'électricité de toute provenance (hydroélectricité, fission nucléaire, énergie éolienne ou thermique) peut servir à la production d'hydrogène. Dans de nombreux pays, les chercheurs tentent de trouver de nouvelles techniques de production de l'hydrogène, dont l'une consisterait à décomposer l'eau sous l'action de la lumière solaire.

Les véhicules à hydrogène ne deviendront probablement pas une réalité dans un proche avenir. À long terme par contre, l'hydrogène offre des propriétés intéressantes comme combustible. Dans les chapitres suivants, nous examinerons quelques aspects de la production et de l'utilisation de l'hydrogène.

PRODUCTION DE L'HYDROGÈNE

L'hydrogène peut être produit à partir de nombreuses sources:

- les charges de départ pétrolières légères, par reformage à la vapeur;
- les charges de départ carbonifères comme le charbon, par gazéification et réaction avec la vapeur;
- l'eau, par électrolyse avec l'électricité produite à partir de ressources renouvelables ou non renouvelables.

L'hydrogène peut ensuite servir à plusieurs fins:

- augmentation de la production de carburants pétroliers liquides;
- source d'énergie pour les moteurs à piston et les turbines;
- production d'électricité dans les piles à combustible.

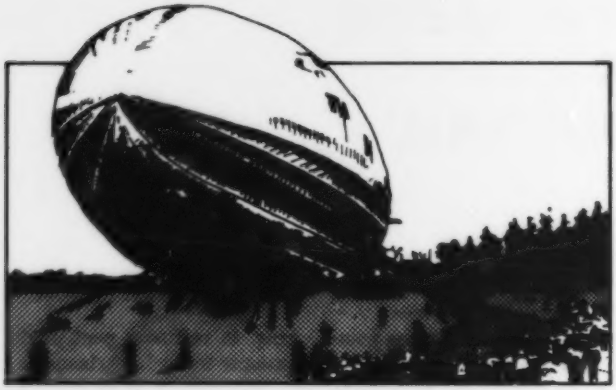
HISTORIQUE DE L'UTILISATION DE L'HYDROGÈNE DANS LES TRANSPORTS

L'intérêt manifesté pour les propriétés combustibles de l'hydrogène ne date pas d'aujourd'hui. Depuis qu'un aristocrate anglais du nom de Henry Cavendish a découvert ce qu'il appelait l'« air inflammable » en 1766, les scientifiques ont étudié les possibilités de l'hydrogène.

L'hydrogène a d'abord été utilisé dans les transports pour assurer la portance des ballons et dirigeables. En 1783, un scientifique français, Jacques Alexandre César Charles, fabriqua un petit ballon de soie qu'il recouvrit d'une solution de caoutchouc afin de le rendre étanche à l'air; le ballon rempli d'hydrogène partit de Paris et parcourut environ 20 km, volant à 2 m au-dessus du sol. Il atterrit dans un petit village. Les habitants furent si terrifiés par le bruit du gaz qui s'échappait du ballon qu'ils le détruisirent à coups de fourches. Quelques années plus tard, le premier vol en ballon à hydrogène avait lieu aux États-Unis.

Au début du XX^{e} siècle, les dirigeables allemands — des aéronefs rigides appelés « zeppelin » du nom de leur inventeur — poussèrent l'emploi de l'hydrogène plus loin. Dans ces aéronefs, l'hydrogène assurait non seulement la portance de l'aéronef, mais servait aussi de combustible de poussée. Durant les longs voyages, la portance du dirigeable augmentait à mesure que le combustible primaire, habituellement un mélange de benzol et d'es-

L'hydrogène a été utilisé pour la première fois aux fins de transport comme corps plus léger que l'air dans les ballons.



Le Hindenburg fut l'un des plus gros aéronefs pour passagers au cours des années 1930. Long de 245 mètres, d'un diamètre de 41,2 mètres, il était muni de l'équipement le plus moderne. Outre 25 cabines à deux couchettes, ce zeppelin géant offrait à ses passagers une vaste salle à manger, une grande cuisine, des toilettes et des douches, des salons ainsi qu'un pont d'observation avec baies vitrées.

sence, était brûlé. L'hydrogène en trop était brûlé comme combustible d'appoint. Les zeppelins firent de nombreux voyages sans histoire, mais la tragédie de Lakehurst (New Jersey) en 1937 — le *Hindenburg* s'embrasa et 36 personnes périrent dans l'accident — refroidit grandement l'enthousiasme pour ce type de véhicule.

Déjà au cours du siècle dernier, plusieurs scientifiques eurent l'idée d'utiliser l'hydrogène comme source d'énergie mécanique, comme l'avait d'ailleurs imaginé Jules Verne dans l'*Île mystérieuse*. Ce n'est que dans les années 1930 que l'on manifesta un intérêt sérieux dans les possibilités de l'hydrogène comme combustible. Les travaux de recherche débutèrent en Europe et en Amérique et s'accentuèrent lorsque la Seconde Guerre mondiale perturba l'approvisionnement en carburants classiques. Ces travaux se poursuivirent au cours des années 1940 et 1950.

Les techniques de production de l'hydrogène sont depuis longtemps bien au point. L'hydrogène fut d'abord produit par hydrolyse de l'eau en 1800, procédé encore utilisé de nos jours dans les endroits où l'électricité est bon marché. En 1873, on inventait le procédé de fabrication du « gaz de ville » qui fut dès lors couramment utilisé pour le chauffage et l'éclairage des habitations. Ce procédé consiste à injecter alternativement de l'air et de la vapeur sur un lit de charbon incandescent, ce qui produit un mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Aujourd'hui, on emploie une technique similaire pour fabriquer du gaz de synthèse, utilisé dans de nombreux procédés industriels.

L'intérêt pour l'hydrogène gazeux a ouvert la voie aux travaux sur les utilisations possibles de cet élément dans les transports, notamment sous forme d'hydrogène liquide et dans les piles à combustible hydrogène-air. En 1896, Sir James Dewar, un scientifique britannique, fut le premier à produire de l'hydrogène liquide, lequel sert maintenant de combustible dans les fusées. Vers 1950, on fabriqua la première pile à combustible hydrogène-air fonctionnelle. Dans cette pile, une réaction entre l'hydrogène et l'oxygène produit de l'électricité et de l'eau. Depuis, un certain nombre de fabricants d'automobiles ont réalisé des expériences avec les piles à combustible.

L'HYDROGÈNE DANS L'INDUSTRIE

L'hydrogène est employé dans bon nombre de procédés industriels, en particulier pour la production des carburants pétroliers liquides à partir du pétrole brut classique et du pétrole brut synthétique. Une grande partie des procédés de fabrication de l'essence et des autres carburants si essentiels aux transports reposent sur l'utilisation de l'hydrogène.

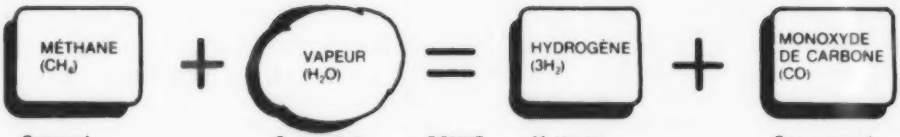
Tous les combustibles tirés des hydrocarbures sont composés de carbone et d'hydrogène, et la proportion de ces deux éléments détermine les propriétés des combustibles. Les combustibles à haute teneur en carbone, tels le goudron, sont composés de grosses molécules; par conséquent, ils sont lourds et peu volatils. D'autre part, les combustibles riches en hydrogène, comme le gaz naturel et le propane, sont composés de petites molécules et ils sont donc légers et volatils.

Le secret du raffinage du pétrole réside dans l'art de jongler avec ces diverses molécules afin de produire les hydrocarbures dont nous avons besoin, principalement des combustibles liquides légers et riches en hydrogène. En ajoutant de l'hydrogène aux molécules lourdes par une série de procédés complexes, les raffineries parviennent à produire des combustibles légers. Grâce à l'hydrogène, le raffineur peut produire en grande quantité les hydrocarbures de son choix, tout en minimisant la production des hydrocarbures pour lesquels la demande est faible. À mesure que le Canada accroîtra sa production de pétrole brut synthétique, à partir notamment des sables bitumineux, l'hydrogène prendra une place capitale dans le raffinage.

Le raffinage du pétrole n'est pas le seul secteur industriel où l'hydrogène joue un rôle crucial. La fabrication de l'ammoniac, un engrais important en agriculture, consomme en effet d'importantes quantités d'hydrogène.

Reformage à la vapeur: le procédé de l'heure

La majeure partie de l'hydrogène employé dans le raffinage et dans la pétrochimie est obtenu par un procédé appelé reformage à la vapeur. La technique la plus courante de reformage à la vapeur utilise le gaz naturel comme matière de base. On fait réagir le méthane (principal composant du gaz naturel avec une proportion massique de 85 %) avec la vapeur à des températures élevées, ce qui donne un gaz de synthèse composé d'hydrogène et de monoxyde de carbone. En notation chimique (où « C » représente un atome de carbone et « H » un atome d'hydrogène), la réaction se déroule comme suit :



Composé d'un atome de carbone et de quatre atomes d'hydrogène

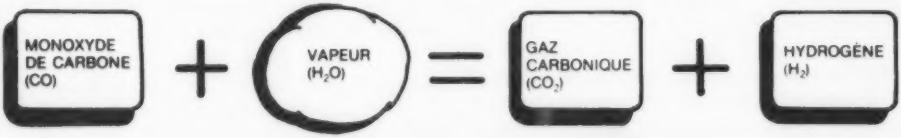
Composé de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène

DONNE

Molécules d'hydrogène

Gaz composé des atomes de carbone et d'oxygène restants

Après refroidissement du gaz de synthèse, on le fait circuler dans un « convertisseur », dans lequel la proportion relative de monoxyde de carbone et d'hydrogène est modifiée de façon à donner une quantité maximale d'hydrogène. À cette fin, on fait réagir le monoxyde de carbone avec de la vapeur, ce qui donne du gaz carbonique et de l'hydrogène :



Le gaz est ensuite refroidi et on le fait circuler dans un épurateur liquide et dans un réacteur catalytique, afin d'extraire le gaz carbonique et le monoxyde de carbone qui n'a pas été transformé.

À l'heure actuelle au Canada, c'est ce procédé qui fournit la majeure partie de l'hydrogène dont nous avons besoin. Par son emploi dans le raffinage du pétrole, l'hydrogène représente déjà près de 2 % de notre utilisation d'énergie primaire. Comme le souligne le chapitre suivant, l'hydrogène est appelé à jouer un rôle encore plus important à l'avenir.

L'HYDROGÈNE — UNE DEVISE ÉNERGÉTIQUE

Jusqu'à présent, l'utilisation de l'hydrogène à grande échelle a été restreinte au raffinage du pétrole et à la pétrochimie (notamment pour la production de méthanol et d'ammoniac). L'hydrogène pourrait toutefois devenir une sorte de « monnaie d'échange » énergétique permettant d'emmagasiner et de transporter l'énergie qui serait produite à partir de sources variées.

Comme nous l'avons indiqué précédemment, l'hydrogène n'existe pas à l'état pur sur terre et il faut l'extraire des substances qui contiennent des atomes d'hydrogène. La majeure partie de l'hydrogène que nous utilisons aujourd'hui provient du gaz naturel. Il ne servirait à rien cependant d'utiliser cet hydrogène dans les véhicules, car le gaz naturel est lui-même un excellent carburant et il faut de plus dépenser de l'énergie afin d'extraire cet hydrogène.

L'électrolyse — source inépuisable d'hydrogène?

La source première d'hydrogène est l'eau, l'une des substances les plus abondantes sur terre. Il est possible de décomposer l'eau en ses constituants, l'oxygène et l'hydrogène, en faisant passer dans l'eau un courant électrique. Ce procédé est appelé électrolyse.

L'électrolyse consiste à appliquer un courant électrique à deux électrodes immergées dans une solution d'eau et d'électrolyte acide ou alcalin. Le passage du courant produit de l'hydrogène près d'une électrode et de l'oxygène près de l'autre. La quantité d'hydrogène et d'oxygène ainsi produite dépend de l'intensité du courant entre les électrodes et de la température de l'électrolyte.

On se sert de l'électrolyse afin de produire de l'hydrogène très pur, en particulier pour les industries alimentaire et pharmaceutique, lesquelles sont disposées à débourser ce qu'il faut pour avoir un degré élevé de pureté. Au Canada, l'hydrogène obtenu par électrolyse coûte plus cher que l'hydrogène tiré du gaz naturel. La production d'hydrogène par électrolyse est rentable seulement lorsque l'électricité est bon marché et abondante, ou lorsque les hydrocarbures sont trop chers ou difficiles à obtenir.

À l'heure actuelle, on utilise principalement deux types d'électrolyseurs de par le monde : l'électrolyseur unipolaire (ou électrolyseur à « cuve »), et l'électrolyseur bipolaire (ou électrolyseur à « filtre-presse »).

Ces deux types d'électrolyseurs ont plusieurs caractéristiques en commun : l'électrolyte est une solution de 20 à 30 % d'hydroxyde de potassium dans de l'eau pure, la cathode est en fer et l'anode en nickel ou en fer plaqué nickel, et un diaphragme d'amiante sépare les compartiments de l'élément. Ce qui différencie les deux appareils, c'est l'agencement des éléments et la polarisation des électrodes.

Dans l'électrolyseur unipolaire, les électrodes, placées parallèlement les unes aux autres, sont immergées à la verticale dans une cuve contenant l'électrolyte. Les électrodes sont montées en parallèle, ce qui signifie que chaque électrode a une même polarité par rapport à l'autre, d'où le terme « unipolaire ». Les éléments unipolaires présentent deux avantages: 1) leur construction nécessite peu de pièces, lesquelles sont par ailleurs peu coûteuses; et 2) on peut interrompre le fonction-

nement d'un élément en court-circuitant deux éléments adjacents, ce qui n'arrête pas la production d'hydrogène par les autres éléments. Les électrolyseurs unipolaires industriels présentent toutefois un inconvénient: ils ne peuvent pas fonctionner à haute température et à des courants de très haute densité, ce qui limite leur efficacité.

L'électrolyseur bipolaire ressemble à un filtre-presse, c'est-à-dire un sandwich composé de plaques, de séparateurs et de joints isolants. Un des côtés d'une plaque joue le rôle d'anode dans un élément alors que l'autre côté de la plaque joue le rôle de cathode dans l'élément adjacent (d'où le terme « bipolaire »). Les éléments sont montés en série. L'électrolyseur bipolaire présente plusieurs avantages par rapport à l'électrolyseur unipolaire: il peut fonctionner à des densités élevées de courant ainsi qu'à des températures et pressions élevées, et il occupe moins d'espace que l'électrolyseur unipolaire. La fabrication des électrolyseurs bipolaires est toutefois plus exigeante, car il faut respecter des tolérances rigoureuses, ce qui rend cet appareil plus coûteux que l'électrolyseur unipolaire. Les appareils bipolaires ont également un défaut de taille: la difficulté d'entretien des éléments. En effet, si l'un des éléments tombe en panne, il faut retirer toute la série d'éléments afin de réparer l'élément défectueux.

Dans le but de réduire le coût de l'électrolyse et d'en augmenter l'efficacité, les chercheurs tentent de mettre au point de nouveaux types d'électrolyseurs. L'un d'entre eux, l'électrolyseur à polymère solide, semble prometteur; c'est un système bipolaire perfectionné qui emploie un catalyseur. Jusqu'à présent, ce type d'électrolyseur a été mis à l'essai uniquement sur une petite échelle industrielle, mais déjà ses possibilités sont nombreuses: accroissement de l'efficacité des éléments, diminution du coût de l'appareil, amélioration de la fiabilité et de la sécurité.

L'électrolyse est un procédé intéressant, car on peut utiliser l'électricité provenant de n'importe quelle source pour produire de l'hydrogène. C'est toutefois un procédé coûteux. De plus, une quantité considérable d'énergie est perdue lors de la transformation de l'énergie primaire en électricité.

De nombreuses sources d'énergie (uranium, vent, chutes d'eau) peuvent être canalisées d'une seule façon: en les transformant en électricité. L'électrolyse permet de convertir cette électricité en hydrogène, un combustible qu'il est possible de stocker en vue d'une gamme variée d'applications. La souplesse qu'offre à cet égard l'hydrogène contrebalance donc les inconvénients associés à sa production.

La question du coût de l'hydrogène n'est pas pour autant réglée. Le coût de production de l'hydrogène par hydrolyse est étroitement lié à celui de l'électricité. Les prix actuels de l'électricité sont basés sur une demande variable. Un tel système est moins efficace et plus coûteux que la production d'électricité répondant à une demande fixe. On pourrait régler ce problème en produisant l'hydrogène pendant les heures où la demande d'électricité est la plus faible. Ainsi, on stockerait l'électricité sous forme d'hydrogène, ce qui permettrait d'accroître l'efficacité globale du réseau de production d'électricité.

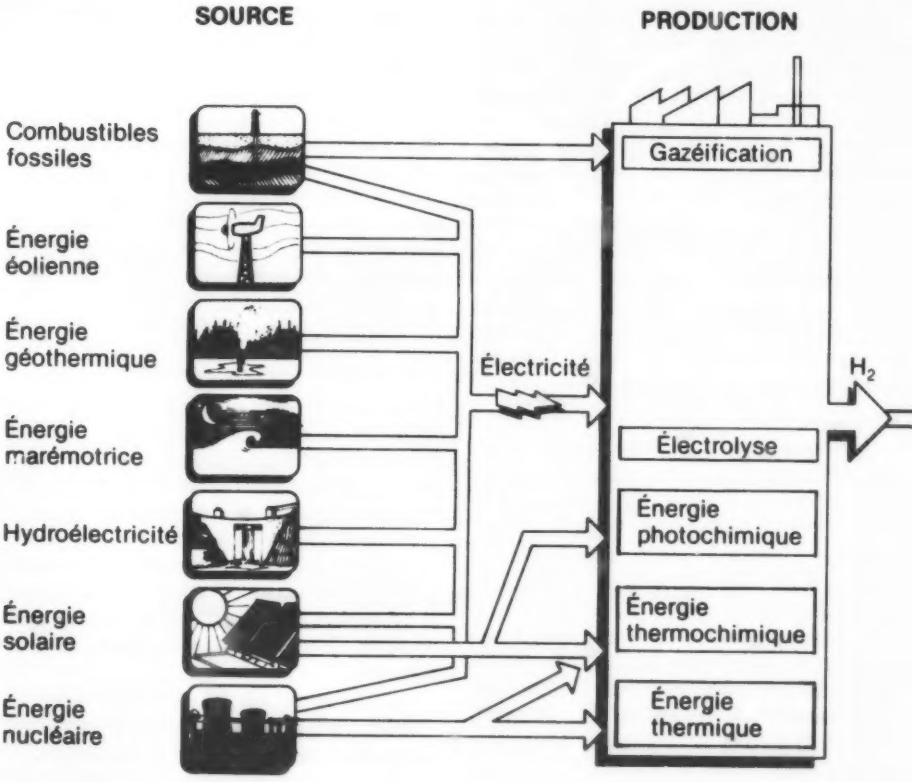
Une économie fondée sur l'hydrogène

Certains chercheurs entrevoient déjà une économie fondée sur l'hydrogène et dans laquelle l'électricité provenant du nucléaire et des ressources renouvelables servirait à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. L'hydrogène serait par la suite emmagasiné jusqu'à ce qu'on en ait besoin. On pourrait le transporter si nécessaire et ensuite l'utiliser pour la production d'électricité ou de chaleur afin de faire fonctionner des moteurs ou des machines.

Dans une telle économie, l'hydrogène serait en quelque sorte une « devise énergétique », une forme d'énergie commune produite à partir de nombreuses sources et pouvant revêtir diverses formes. L'hydrogène produit de l'eau pourrait servir à propulser des véhicules ou encore, par l'intermédiaire des piles à combustible, à faire fonctionner des moteurs

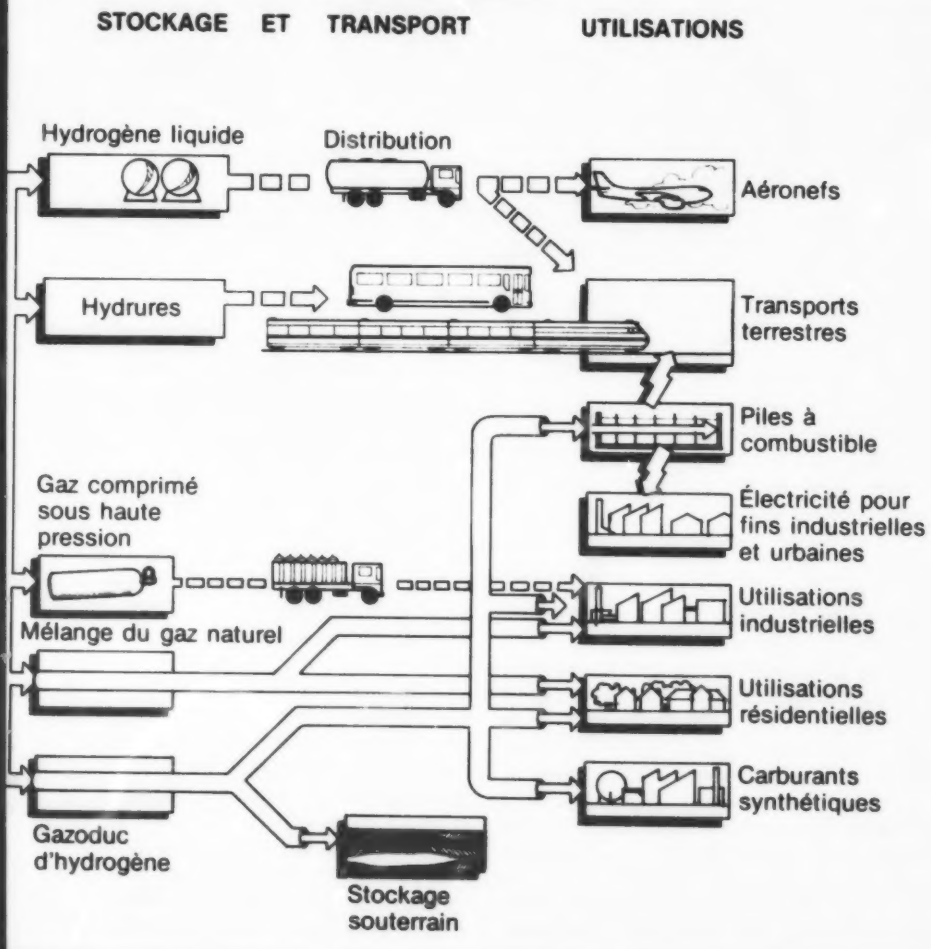
électriques. Toutefois, il faudra attendre l'épuisement des réserves de pétrole avant d'assister à la mise en place d'un tel type d'économie.

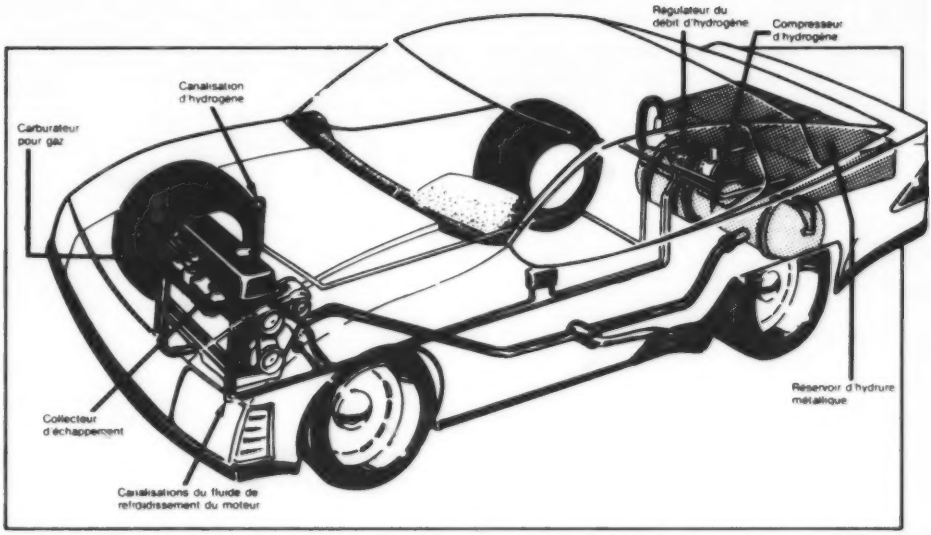
Certes, une économie fondée sur l'hydrogène est intéressante à maints égards, mais elle sera réalisable uniquement si nous parvenons à produire de l'électricité à bien meilleur marché que toutes les autres formes d'énergie.



Déjà auparavant, on avait prédit que la fission nucléaire permettrait de produire des quantités considérables d'électricité à bon marché, mais ce ne fut pas le cas. Toutefois, une « économie de l'hydrogène » deviendra peut-être possible le jour où les combustibles pétroliers coûteront plus cher que les autres combustibles, ou lorsque des progrès seront réalisés en technologie nucléaire ou dans le domaine des énergies renouvelables.

Concept d'une économie fondée sur l'hydrogène: produit à partir de nombreuses sources, l'hydrogène pourrait par la suite être stocké et utilisé pour le transport et diverses autres applications.





Conception artistique d'une automobile fonctionnant à l'hydrogène.

STOCKAGE ET DISTRIBUTION DE L'HYDROGÈNE

Le dilemme du stockage

On peut utiliser l'hydrogène dans les véhicules sous forme gazeuse ou liquide: soit directement dans le moteur, soit dans une pile à combustible. L'utilisation directe de l'hydrogène dans un moteur à piston ou à turbine est intéressante, car l'hydrogène brûle proprement et donne principalement de la vapeur d'eau dans les gaz d'échappement.

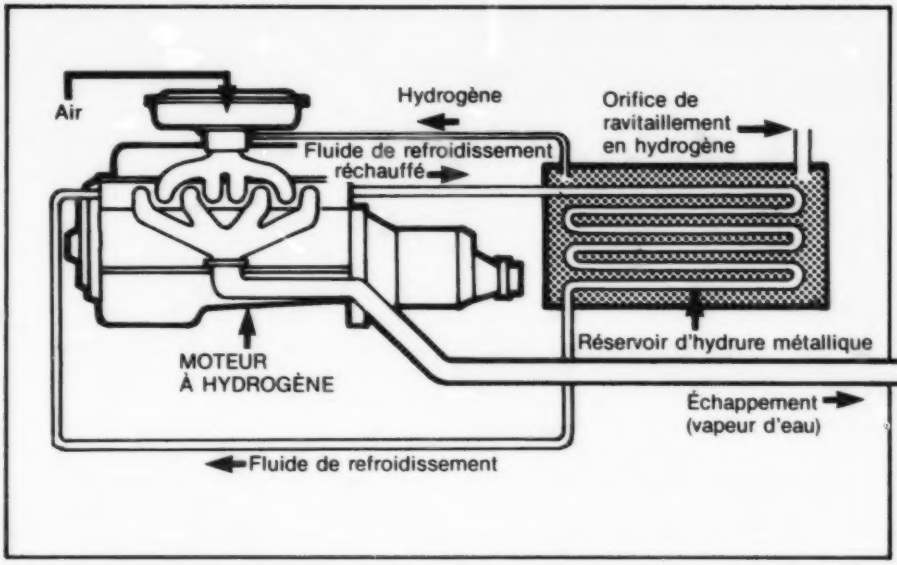
Le stockage de l'hydrogène est cependant difficile et coûteux. D'une part, pour garder l'hydrogène à l'état liquide, il faut le maintenir à une température inférieure à −250 °C. D'autre part, l'étape de liquéfaction consomme de 25 à 30 % de l'énergie contenue dans l'hydrogène gazeux. Cependant, il est possible de stocker l'hydrogène sous forme gazeuse en le comprimant, mais des réservoirs lourds et de grandes dimensions sont nécessaires à cette fin. Comprimé habituellement à une pression de 13,7 MPa (136 fois la pression atmosphérique normale), l'hydrogène gazeux et son réservoir d'acier pèsent 30 fois plus qu'une quantité équivalente d'essence. Le réservoir d'hydrogène représente 99 % du poids total de l'ensemble. Ce même réservoir occupe un volume 24 fois plus grand que celui d'un réservoir contenant la même quantité d'essence.

Le stockage de l'hydrogène est un problème dans les voitures électriques propulsées par des piles à combustible hydrogène-air. Les piles à combustibles sont en fait des électrolyseurs à rebours: elles combinent de l'oxygène et de l'hydrogène pour produire de l'électricité et de l'eau. Les véhicules équipés de piles à combustible ne souffrent pas des inconvénients communs à tous les autres véhicules électriques (poids des batteries et nécessité de les recharger), mais le stockage de l'hydrogène demeure un problème.

Pour les véhicules de grandes dimensions, qu'il s'agisse de navires, d'avions ou de trains, ce problème revêt moins d'importance. Au point de vue technique, la construction d'avions à hydrogène liquide semble réalisable. Dans ce cas précis, le faible poids de l'hydrogène constitue d'ailleurs un avantage. En effet, un avion consomme la majeure partie de son carburant lors du décollage et pour transporter le carburant. Comme l'hydrogène liquide contient deux fois et demie plus d'énergie par unité de poids que les carburéacteurs ordinaires, un avion à hydrogène pourrait parcourir, avec une quantité de combustible donnée, une plus grande distance qu'un avion similaire avec une même quantité de carburéacteur ordinaire (le premier avion devrait toutefois transporter un volume supérieur en hydrogène, en raison de sa faible masse volumique).

Les hydrures métalliques

Pour plusieurs années encore, la mise au point des véhicules à hydrogène sera confrontée au problème du stockage de l'hydrogène dans les véhicules. Cependant, il sera possible un jour de stocker l'hydrogène dans les hydrures métalliques. Lorsque l'hydrogène entre en contact avec certains types de métaux, les molécules d'hydrogène sont adsorbées sur la surface du métal et certains atomes d'hydrogène réussissent à pénétrer dans les cristaux métalliques et à s'y loger. Sous une pression élevée, le métal peut ainsi absorber une bonne quantité d'hydrogène et l'on obtient alors un



Cette illustration indique de quelle façon l'on pourrait se servir des hydrures métalliques pour stocker l'hydrogène en vue de son utilisation dans les véhicules. Par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur, un fluide de refroidissement (de l'eau en l'occurrence) transporte la chaleur résiduelle du moteur dans le réservoir d'hydrure métallique. L'hydrogène dégagé par l'hydrure est acheminé par canalisation au moteur où sa combustion produit de l'énergie mécanique, de la chaleur et de la vapeur d'eau.

hydrure métallique. Ce procédé dégage de la chaleur. Si l'on diminue la pression et l'on chauffe l'hydrure, celui-ci se décompose en métal et en hydrogène gazeux.

Les hydrures métalliques sont intéressants en raison de leur grande capacité de stockage de l'hydrogène. En fait, il est possible de stocker plus d'hydrogène dans un hydrure métallique que dans un même volume d'hydrogène liquide, sans compter que les hydrures seraient plus faciles à transporter qu'un liquide volatil.

Les travaux de recherche sur les hydrures métalliques en sont encore aux étapes préliminaires. De nombreux problèmes devront toutefois être réglés avant que l'on puisse mettre au point un dispositif fonctionnel de stockage utilisant les hydrures métalliques. De toute évidence, il faudra attendre de nombreuses années avant que les véhicules à hydrogène ne deviennent une réalité.

Économie, sécurité et logistique

On réussira sans aucun doute à régler les problèmes techniques liés à l'utilisation de l'hydrogène dans les transports. Mais l'on doit également envisager l'aspect économique de la question. L'intérêt de l'hydrogène dépend étroitement du coût des carburants pétroliers classiques. Si le prix du pétrole dépasse celui de l'électricité, il est manifeste que l'hydrogène devient, du coup, une solution intéressante. Mais nul ne peut prédire quand cette augmentation des prix aura lieu, ou même si elle aura lieu.

Les questions de sécurité et de logistique sont capitales si l'on envisage d'utiliser l'hydrogène comme combustible pour véhi-

cules. La catastrophe du *Hindenburg* à donné une mauvaise réputation à l'hydrogène et l'on est venu à considérer cet élément comme dangereux pour les utilisations publiques. Mais en fait, la plupart des personnes tuées lors de l'accident du *Hindenburg* avaient sauté du dirigeable avant que celui-ci ne touche le sol, et leur mort n'est pas attribuable à l'explosion ou à l'incendie qui suivit. En réalité, l'hydrogène est plus sûr que la plupart des combustibles ordinaires que nous employons chaque jour dans nos maisons et nos véhicules, pourvu évidemment que des mesures élémentaires de précaution soient prises.

Même si l'hydrogène est plus inflammable que l'essence, la combustion de l'hydrogène dégage moins de chaleur radiante que la combustion de l'essence. Mais comment déceler les fuites d'hydrogène, un gaz incolore et inodore? Il suffit de lui ajouter des agents odorants, tout comme l'on fait avec le gaz naturel. On peut aussi ajouter à l'hydrogène des agents éclairants, de sorte que sa combustion donne une flamme bien visible.

L'hydrogène est utilisé sans problème dans l'industrie, car son stockage et sa manutention font l'objet de contrôles appropriés. Les travaux de recherche sur les dangers de l'hydrogène indiquent que cet élément peut être utilisé en toute sécurité dans les véhicules, pourvu que certaines règles et mesures de protection soient prises.

Les carburants pétroliers liquides qui propulsent nos automobiles et nos camions sont livrés à la pompe par l'intermédiaire d'un réseau efficace de distribution et de ravitaillement, réseau qui débute à la raffinerie et se termine à la station-service. Si l'on veut que l'hydrogène devienne un jour un combustible répandu, on devra mettre en place un réseau tout aussi efficace de transport et de distribution. Un tel réseau devra incorporer plusieurs des éléments auxquels les consommateurs sont déjà habitués avec les carburants pétroliers: sécurité, ravitaillement rapide et facile, installations appropriées de mesure et de stockage de l'hydrogène à la station-service. Trois modes de distribution sont possibles: distribution de l'hydrogène gazeux par gazoduc, distribution de l'hydrogène liquide aux stations-service par camions-citernes (un peu comme on distribue actuellement l'essence et le carburant diesel), ou électrolyse au point même de ravitaillement.

Il va de soi que le réseau de distribution et de ravitaillement dépendra de ce qui sera utilisé dans les véhicules: hydrogène gazeux ou hydrogène liquide. Le type de véhicule qui sera retenu dépendra, quant à lui, des résultats des recherches sur le stockage de l'hydrogène dans les véhicules. Compte tenu des nombreuses incertitudes qui demeurent, l'emploi de l'hydrogène comme combustible pour les transports terrestres n'est pas pour demain, sauf peut-être dans quelques secteurs très spécialisés. Mais l'augmentation éventuelle du prix du pétrole et la poursuite des recherches visant à améliorer les techniques de production et d'utilisation de l'hydrogène pourraient bien en faire le combustible du XXI^{e} siècle.

GLOSSAIRE

Agent éclairant	Hydrocarbure qui brûle en dégageant une flamme vive; utilisé comme additif dans certains combustibles afin de les rendre visibles lorsqu'ils brûlent.
Ampère-heure	Quantité de courant électrique produite par une différence de tension de 1 volt aux bornes d'une résistance de 1 ohm pendant une heure (voir Capacité d'une batterie).
Anode	Électrode positive d'une batterie; c'est à partir de l'anode que le courant électrique passe dans l'électrolyte.
Batterie au plomb	Type de batterie secondaire, ou accumulateur, faite d'une plaque positive de bioxyde de plomb et d'une plaque négative de plomb pur, toutes deux immergées dans un électrolyte composé d'eau et d'acide sulfurique. C'est ce type de batterie que l'on retrouve dans les automobiles ordinaires. Peut être rechargée.
Batterie de démarrage, d'éclairage et d'allumage	Type d'accumulateur utilisé dans un véhicule ordinaire pour démarrer le moteur et alimenter en électricité les circuits d'allumage et d'éclairage du véhicule.
Batterie de voiturette de golf	Type de batterie habituellement utilisé pour propulser certains véhicules électriques, comme les voiturettes de golf et les chariots élévateurs. La durée de vie d'une telle batterie est de 200 à 400 cycles de fonctionnement.
Batterie nickel-fer	Type récent et perfectionné d'accumulateur utilisant des électrodes de nickel et de fer et un électrolyte d'hydroxyde de potassium.
Batterie nickel-zinc	Type récent et perfectionné d'accumulateur utilisant des électrodes de nickel et de zinc, ainsi qu'un électrolyte d'hydroxyde de potassium.
Batterie sodium-soufre	Type perfectionné d'accumulateur utilisant des électrodes de soufre et de sodium liquide et dans lequel du verre solide ou de la céramique joue le rôle de l'électrolyte.
Bioxyde de plomb	Composé de plomb ($PbSO_2$) servant d'électrode dans les batteries au plomb.
Bitume	Mélange visqueux d'hydrocarbures qui existe à l'état naturel mais dont l'extraction n'est pas rentable avec les méthodes classiques. Désigne aussi les résidus d'hydrocarbures produits par le raffinage de certains pétroles bruts.
Capacité d'une batterie	Mesure de la capacité de stockage d'une batterie électrique. Cette quantité est égale au courant électrique multiplié par le temps pendant lequel la batterie fournit le courant à une tension donnée (voir Ampère-heure).
Capacité de stockage	Quantité d'énergie fournie par une réaction chimique et qui peut être emmagasinée pour utilisation ultérieure lorsque la réaction est inversée.
Carburants classiques	Expression qui désigne les carburants liquides obtenus par le raffinage du pétrole brut.

Carburants synthétiques	Combustibles liquides ou gazeux, similaires à ceux qui sont extraits du pétrole brut léger. Ils sont produits à partir de diverses substances: bitume, pétrole lourd, gaz naturel, charbon ou biomasse.
Catalyseur	Substance qui, sans subir de modification chimique, facilite une réaction chimique et permet à celle-ci d'avoir lieu même dans des conditions défavorables (par exemple, à une température ou à une pression plus faible qu'à l'ordinaire).
Cathode	Électrode négative d'une batterie. C'est le point d'où part le courant électrique.
Condensat	Mélange de pentanes et d'hydrocarbures plus lourds retirés des puits de pétrole ou de gaz; ils sont gazeux à la production mais se liquéfient en refroidissant à la surface.
Convertisseur	Dispositif de traitement servant à modifier la proportion de monoxyde de carbone dans le gaz de synthèse obtenu à partir du charbon, dans le but d'atteindre la proportion optimale pour la production de méthanol.
Courant alternatif	Courant électrique qui change régulièrement de direction dans un circuit, habituellement 120 fois par seconde (on parle alors de courant « 60 cycles »).
Courant continu	Courant électrique continu, d'amplitude fixe et circulant dans une seule direction.
Densité de puissance	Puissance que peut fournir une batterie à un moment donné par unité de volume.
Densité énergétique	Capacité de stockage de l'énergie par unité de poids ou de volume.
Durée de vie	Nombre de fois qu'une batterie peut être déchargée à 80 % de sa capacité.
Électrode	Conducteur fait d'un matériau solide et réactif, habituellement un métal ou un oxyde métallique, et qui laisse passer le courant électrique dans un circuit.
Électrolyse	Décomposition chimique d'un électrolyte sous l'action d'un courant électrique. L'électrolyse sert notamment à décomposer l'eau en ses deux constituants, l'hydrogène et l'oxygène.
Électrolyte	Conducteur électrique non métallique dans lequel le courant est transporté par des ions positifs et négatifs.
Épurateur liquide	Appareil servant à enlever les impuretés d'un gaz par circulation de celui-ci au-dessus de surfaces ou de brosses en rotation et partiellement immergées dans un liquide.
Freinage rétroactif	Stockage de l'énergie dégagée par le freinage d'un véhicule; cette énergie est réutilisée lors de l'accélération.
Fission nucléaire	Rupture du noyau d'un atome lourd et instable en deux parties, habituellement accompagnée de l'émission de radiation, de chaleur et de neutrons.

Gaz de pétrole liquéfié	Groupe d'hydrocarbures gazeux, principalement du butane et du propane, produit lors de l'extraction du pétrole brut et du gaz naturel; c'est aussi un sous-produit du raffinage. Ces gaz sont comprimés sous forme liquide afin d'en faciliter le stockage, le transport ainsi que l'emploi comme combustibles.
Gaz de synthèse	Mélange de monoxyde de carbone et d'hydrogène utilisé comme charge de départ pour la fabrication des carburants synthétiques.
Gaz de ville	Gaz combustible à teneur élevée en hydrogène et produit à partir du charbon.
Gaz naturel	Mélange inflammable d'hydrocarbures gazeux, principalement du méthane. Existe à l'état naturel et est habituellement associé au pétrole brut.
GPL	*Voir* Gaz de pétrole liquéfié.
Hydrocarbure	Terme désignant une vaste famille de composés chimiques contenant uniquement des atomes de carbone et d'hydrogène, et qui sont à la base de tous les produits pétroliers. Les hydrocarbures qui ont peu d'atomes de carbone sont des gaz et ceux qui en ont en grand nombre sont des solides.
Hydrogène	Le plus simple et le plus léger des éléments. Dans sa forme moléculaire, c'est un gaz incolore, inodore et sans goût, mais on ne le retrouve pas sous cette forme dans la nature.
Hydrure métallique	Combinaison chimique d'un métal avec l'hydrogène. Il est possible de stocker de l'hydrogène dans des hydrures métalliques à des pressions relativement faibles.
Inflammable	Qui s'enflamme facilement et brûle vivement.
Ion	Atome qui a une charge positive ou négative à la suite de la perte ou du gain, respectivement, d'un électron.
Méthane	Gaz inflammable, incolore et inodore, de formule CH_4, ce qui en fait le plus simple des hydrocarbures. C'est le principal composant du gaz naturel.
Métro léger	*Voir* Métro léger automatisé.
Métro léger automatisé	Mode de transport en commun par voitures électriques commandées automatiquement ou semi-automatiquement et roulant sur des voies séparées, seules ou en rames.
Micro-voiture	Véhicule urbain pouvant accommoder un à trois passagers. Les micro-voitures électriques peuvent atteindre des vitesses de 60 km/h et elles ont une autonomie de 40 à 80 km par charge.
Monoxyde de carbone	Gaz toxique, inodore et incolore composé en parties égales de carbone et d'oxygène. Produit de la combustion partielle (oxydation) des carburants.
Moteur à induction linéaire	Dispositif électromagnétique ressemblant à un moteur électrique classique que l'on aurait « déroulé » et dont on aurait fixé le rotor à la voie.

Moteur à piston	Type de moteur caractérisé par le mouvement alternatif de pistons logés dans des cylindres. La plupart des automobiles sont équipées d'un moteur à piston.
Moteur à turbine	Type de moteur qui transforme l'énergie cinétique d'un fluide en déplacement en énergie mécanique grâce à la rotation d'un jeu d'aubes.
Pétrole synthétique	Pétrole produit par le préraffinage des pétroles lourds et du bitume.
Pile à combustible	Pile électrochimique dans laquelle l'énergie est produite directement par oxydation d'un combustible, par exemple l'hydrogène.
Piston	Organe du moteur qui coulisse dans le cylindre sous l'effet de l'explosion du carburant.
Plaque négative	*Voir* Cathode.
Plaque positive	*Voir* Anode.
Polymère	Substance formée par le regroupement de plusieurs molécules simples identiques (appelées monomères) en molécules géantes. Par exemple, le polyéthylène est un polymère de l'éthylène.
Propane	Hydrocarbure gazeux lourd, volatil et incolore, de formule C_3H_8, facilement liquéfiable à température ambiante. C'est le principal composant du gaz de pétrole liquéfié. Peut être extrait du gaz naturel et peut également être produit lors du raffinage.
Propulsion magnétique	Type de propulsion dans lequel un véhicule est soulevé et propulsé par la force magnétique induite par l'électricité.
Raffinage	Ensemble de procédés visant à séparer le pétrole brut en ses divers composants chimiques, lesquels sont par la suite transformés en produits utilisables.
Reformage à la vapeur	Procédé de fabrication du gaz de synthèse qui consiste à faire circuler du méthane ou un autre hydrocarbure gazeux au-dessus d'un catalyseur, à des températures élevées.
Réseau maillé	Réseau de conducteurs servant à la distribution de l'électricité.
Réserves de pétrole classique	Pétrole brut et condensats qui peuvent être récupérés d'une roche réservoir souterraine à l'aide des techniques classiques de production.
Sulfate de plomb	Composé de plomb (Pb_3SO_4) formé par la réaction du plomb et de l'acide sulfurique dans une batterie au plomb.
Transport rapide sur rail lourd	Terme général qui désigne les réseaux de transport en commun à haute capacité (de 25 000 à 40 000 passagers par heure dans une direction donnée). Certains véhicules sur rail lourd (dont les voitures de métro) roulent sur des voies qui leur sont exclusivement réservés; d'autres (dont les trains de banlieue) partagent les voies avec d'autres véhicules ferroviaires.
Trolleybus	Véhicule électrique sur pneus de caoutchouc. L'alimentation électrique est assurée par un ensemble de câbles aériens.

Véhicule électrique	Véhicule autonome (automobile, fourgonnette) propulsé par l'électricité fournie par une batterie.
Véhicule hybride	Véhicule électrique muni d'un moteur à essence et d'un moteur électrique couplés à un même arbre de transmission. L'essence fournit une puissance d'appoint à la batterie électrique et augmente le rendement et l'autonomie du véhicule.
Volant	Disque lourd qui absorbe et emmagasine l'énergie grâce à son inertie. Le volant égalise également les fluctuations dans l'énergie fournie.
Volatil(e)	Qui se vaporise facilement à température relativement faible.
Watt	Unité de puissance égale à la consommation d'un joule par seconde. Si l'on parle de courant électrique, la puissance en watts est obtenue en multipliant l'intensité (en ampères) par la tension (en volts).
Watt-heure par kilogramme	Quantité d'énergie par unité de poids produite durant une période donnée (voir Densité énergétique).

Available in English under the title
FUTURE TRANSPORTATION FUELS
ELECTRIC AND HYDROGEN POWERED TRANSPORTATION